

**APLICACIÓN DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS PARA MAXIMIZAR LA  
EFICIENCIA DEL PROCESO DE DESMEDULADO**

**CAMILO ERNESTO BALANTA LASSO**

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE OCCIDENTE  
FACULTAD DE INGENIERIA  
DEPARTAMENTO DE OPERACIONES Y SISTEMAS  
PROGRAMA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL  
SANTIAGO DE CALI  
2014**

**APLICACIÓN DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS PARA MAXIMIZAR LA  
EFICIENCIA DEL PROCESO DE DESMEDULADO**

**CAMILO ERNESTO BALANTA LASSO**

**Pasantía institucional para optar el título de  
Ingeniero Industrial**

**Director  
ALVARO ARARÁ  
Ingeniero Industrial**

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE OCCIDENTE  
FACULTAD DE INGENIERIA  
DEPARTAMENTO DE OPERACIONES Y SISTEMAS  
PROGRAMA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL  
SANTIAGO DE CALI  
2014**

**Nota de aceptación:**

**Aprobado por el Comité de Grado  
en cumplimiento de los requisitos  
exigidos por la Universidad  
Autónoma de Occidente para optar  
al título de Ingeniero Industrial**

**YIMMI DAVILA  
Jurado**

**ALVARO ARARÁ  
Director**

**Santiago de Cali, 10 de Septiembre de 2014**

A Dios por ser mi Guía e infundirme ese sentimiento de tranquilidad, esperanza y fortaleza en cada momento de esta etapa que está próxima a culminar. Espero ser digno por tan valioso esfuerzo.

A mis padres, Tobías Balanta Murillo y Pastora Lasso Ortiz. No hay un día en el que no le agradezca a Dios el haberme colocado entre ustedes y tenerlos conmigo.

A mis hermanos, en especial a Cristhian Fernando, gracias por servirme de guía, por acompañarme siempre y sobre todo por ser mi amigo.

A mis familiares y amigos, su apoyo incondicional fue fundamental para no desfallecer en este largo recorrido.

Si algo me enseñó esta carrera es que mis compañeros de estudio son personas muy valiosas. Al terminar esta etapa me queda la satisfacción de haber compartido con ustedes. Les doy las gracias por su apoyo y afecto y le pido al Altísimo, les colme de muchos éxitos y bendiciones.

“...se requiere de muchos estudios para ser profesional, pero se requiere de toda una vida para aprender a ser persona”.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco en primer lugar a Dios por la fortaleza, la perseverancia y las bendiciones recibidas.

Escribo estas líneas en consideración a mi más profundo y sincero agradecimiento a todas aquellas personas que con su apoyo han contribuido en la realización del presente trabajo y culminación de mi carrera profesional, con mención especial a la comprensión, paciencia y el ánimo recibido de mi familia y grupo de amigos “los Klim”.

Infinita gratitud al Ing. Álvaro Arará, director de trabajo de grado, y el Ing. Aníbal Tabares Marín, director empresarial, por la orientación, el seguimiento y la supervisión continúa, pero sobre todo por la motivación y el apoyo recibido.

Quisiera hacer extensiva mi gratitud a los Ingenieros Freddy Arroyo, Juan Carlos Sarmiento, Juan Carlos Aros, Luis Ezquivel, y Julián Lago; al personal de la empresa Productora de Papel, en especial del Área de Pulpa y Papel por su amistad, colaboración y enseñanza.

También quiero dar las gracias a todos mis profesores durante la carrera profesional por su grandioso aporte a mi formación integral, en especial a la Ph.D. Gloria Mercedes López, por sus consejos, instrucciones y más que todo por su amistad.

Son muchas las personas que han formado parte de mi formación profesional a las que quiero agradecer su amistad, consejos, apoyo, y compañía en los momentos más difíciles de mi vida. Algunas están aquí conmigo y otras en mis recuerdos y en mi corazón. Sin importar en donde estén quiero darles las gracias por formar parte de mí y por todo lo que me han brindado.

A todos ellos, muchas gracias y que Dios los bendiga.

## CONTENIDO

	pág.
<b>GLOSARIO</b>	<b>17</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>20</b>
<b>1. ANTECEDENTES</b>	<b>23</b>
1.1. EL PROCESO DE DESMEDULADO EN SECO	25
1.2. EL PROCESO DE LAVADO	25
1.3. EL PROCESO DE DESMEDULADO EN HÚMEDO	28
<b>2. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN</b>	<b>29</b>
2.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	29
<b>3. JUSTIFICACIÓN</b>	<b>32</b>
<b>4. OBJETIVOS</b>	<b>33</b>
4.1. OBJETIVO GENERAL	33
4.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS	33
<b>5. MARCO DE REFERENCIA</b>	<b>34</b>
5.1. MARCO TEÓRICO	34
5.1.1. La caña de azúcar.	34
5.1.2. El desmedulador.	35
5.1.3. Diseño de experimentos o DOE	36
<b>6. METODOLOGÍA</b>	<b>50</b>
6.1. ETAPA 1: DOCUMENTACIÓN Y TRAZABILIDAD DEL BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR	50
6.2. ETAPA 2: CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO DE DESMEDULADO	50
6.3. ETAPA 3: EXPERIMENTACIÓN	51
<b>7. DESARROLLO</b>	<b>52</b>
7.1. ETAPA 1: DOCUMENTACIÓN Y TRAZABILIDAD DEL BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR.	52
7.1.1. Composición del bagazo de la caña de azúcar	53
7.1.2. Trazabilidad del bagazo de caña de azúcar en la planta de desmedulado.	56
7.2. ETAPA 2: CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO DE DESMEDULADO	57
7.2.1. Análisis de las 5 m's en la planta de desmedulado.	61
7.2.2. Diagramas	76
7.2.3. Detalle de herramienta	81
7.3. ETAPA 3: DISEÑO ESTADISTICO DE EXPERIMENTO	87
7.3.1. Diseño completamente al azar (dca)	88
7.3.2. Diseño factorial 2 <sup>2</sup>	101
7.3.3. Diseño factorial con tres factores	118

<b>8. RESULTADOS OBTENIDOS</b>	<b>135</b>
<b>9. CONCLUSIONES</b>	<b>141</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>143</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>145</b>

## LISTA DE CUADROS

	<b>Pág.</b>
<b>Cuadro 1. Registro de Datos de un DCA</b>	44
<b>Cuadro 2. Tabla de la ANOVA</b>	45
<b>Cuadro 3. Cuadro de registro de datos de los diseños factoriales</b>	47
<b>Cuadro 4. Equipos de la sub-fase de compactación y cargue</b>	62
<b>Cuadro 5. Equipos de la sub-fase de desmedulado</b>	63
<b>Cuadro 6. Riesgos y mecanismos de protección</b>	74
<b>Cuadro 7. Matriz de aspectos e impacto ambientales</b>	76
<b>Cuadro 8. Tratamientos del DCA – Comparación de configuración de cuchillas</b>	89
<b>Cuadro 9. Datos para el cálculo del ANOVA en el contenido de fibra del bagazo desmedulado</b>	91
<b>Cuadro 10. ANOVA - Contenido de fibra en el bagazo desmedulado</b>	92
<b>Cuadro 11. Datos para el cálculo del ANOVA del contenido de fibra en el Polvillo</b>	93
<b>Cuadro 12. Hipótesis con los posibles pares de medias para el bagazo desmedulado</b>	99
<b>Cuadro 13. Medias de contenido de fibra en el bagazo desmedulado para los tratamientos a comparar</b>	99
<b>Cuadro 14. Datos para la aplicación de la prueba LSD para el bagazo desmedulado</b>	99
<b>Cuadro 15. Hipótesis con los posibles pares de medias para el Polvillo</b>	100
<b>Cuadro 16. Datos para la aplicación de la prueba LSD para el Polvillo</b>	101
<b>Cuadro 17. Notaciones del Diseño Factorial 2<sup>2</sup></b>	102



<b>Cuadro 18. ANOVA para el contenido de fibra en el bagazo desmedulado</b>	<b>109</b>
<b>Cuadro 19. ANOVA para el contenido de fibra en el polvillo</b>	<b>109</b>
<b>Cuadro 20. ANOVA para el rendimiento en remoción de cenizas</b>	<b>110</b>
<b>Cuadro 21. . Datos del experimento factorial para el contenido de fibra en el bagazo desmedulado</b>	<b>114</b>
<b>Cuadro 22. Matriz del diseño factorial en unidades originales</b>	<b>121</b>
<b>Cuadro 23 Matriz de diseño en unidades codificadas</b>	<b>121</b>
<b>Cuadro 24. Resultado del contenido de fibra en el bagazo desmedulado – Diseño factorial 3 x 2 x 2 [%]</b>	<b>124</b>
<b>Cuadro 25. Resultados del contenido de fibra en el Polvillo – Diseño factorial 3 x 2 x 2 [%]</b>	<b>124</b>
<b>Cuadro 26. Suma de resultados del contenido de fibra en el bagazo desmedulado.</b>	<b>125</b>
<b>Cuadro 27. Cálculo de los totales marginales del contenido de fibra en el bagazo desmedulado</b>	<b>126</b>
<b>Cuadro 28. Suma de resultados del contenido de fibra en el polvillo</b>	<b>127</b>
<b>Cuadro 29. Cálculo de los totales marginales para el contenido de fibra en el polvillo</b>	<b>128</b>
<b>Cuadro 30. ANOVA para el contenido de fibra en el bagazo desmedulado</b>	<b>129</b>
<b>Cuadro 31. ANOVA simplificado para el contenido de fibra en el bagazo desmedulado</b>	<b>130</b>
<b>Cuadro 32. ANOVA para el contenido de fibra en el polvillo</b>	<b>130</b>
<b>Cuadro 33. ANOVA simplificado para el contenido de fibra en el polvillo</b>	<b>131</b>
<b>Cuadro 34. Resumen de los datos obtenidos en los meses de Junio, Julio y Agosto de 2013</b>	<b>138</b>
<b>Cuadro 35. Ahorro por consumo energético en el mes de Agosto de 2013</b>	<b>138</b>
<b>Cuadro 36. Ahorro previsto en caso de compra de cuchillas nuevas</b>	<b>138</b>

<b>Cuadro 37. Ahorro previsto en caso de compra de cuchillas reparadas</b>	<b>139</b>
<b>Cuadro 38. Beneficios en el mes de Agosto de 2013</b>	<b>139</b>
<b>Cuadro 39. Ahorro energético bajo condiciones de verano</b>	<b>140</b>
<b>Cuadro 40. Estimación de ahorro anual</b>	<b>140</b>

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1. Estación de desmedulado</b>	<b>24</b>
<b>Figura 2. Diagrama de flujo y control de desmedulado y lavado</b>	<b>24</b>
<b>Figura 3. Patio de bagazo de la empresa productora de papel</b>	<b>26</b>
<b>Figura 4. Componentes del equipo desmedulador</b>	<b>26</b>
<b>Figura 5. Esquema de las lavadoras</b>	<b>27</b>
<b>Figura 6. Planta de desmedulado en el central azucarero</b>	<b>28</b>
<b>Figura 7. Caña de azúcar</b>	<b>34</b>
<b>Figura 8. Histograma de los resultados del análisis de Humedad</b>	<b>55</b>
<b>Figura 9. Histograma de los resultados del análisis de Cenizas</b>	<b>55</b>
<b>Figura 10. Gráfico del comportamiento histórico del contenido de fibra en la planta de desmedulado</b>	<b>56</b>
<b>Figura 11. Modelo de Flujo de la planta de desmedulado</b>	<b>77</b>
<b>Figura 12. Área de Pulpa y blanqueo en la Empresa Productora de Papel</b>	<b>78</b>
<b>Figura 13. Diagrama de entrada y salidas de la Planta de Desmedulado</b>	<b>78</b>
<b>Figura 14. Diagrama funcional de bloques de la planta de desmedulado</b>	<b>79</b>
<b>Figura 15. Proceso de bagazo Fase 1(central azucarero)</b>	<b>80</b>
<b>Figura 16. Proceso de bagazo Fase 2 (Desmedulado)</b>	<b>80</b>
<b>Figura 17. Proceso de bagazo Fase 3 (Compactadora)</b>	<b>81</b>
<b>Figura 18. Descripción del Equipo Desmedulador</b>	<b>82</b>
<b>Figura 19. Detalle de Cuchilla Plana</b>	<b>83</b>
<b>Figura 20. Detalle Cuchilla Ventiladora</b>	<b>84</b>
<b>Figura 21. Detalle Criba</b>	<b>85</b>

<b>Figura 22. Detalle Eje Porta cuchillas</b>	<b>86</b>
<b>Figura 23. Gráfico de valores individuales del contenido de fibra en el bagazo desmedulado por tratamiento (% de fibra en el bagazo desmedulado Vs Tratamiento)</b>	<b>90</b>
<b>Figura 24. Gráfico de valores individuales de contenido de fibra en el polvillo por tratamiento</b>	<b>90</b>
<b>Figura 25. Gráfico de la distribución de los datos del contenido de fibra en el bagazo desmedulado</b>	<b>95</b>
<b>Figura 26. Gráfico de la distribución de los datos del contenido de fibra en el polvillo</b>	<b>95</b>
<b>Figura 27. Gráfica de probabilidad normal para el contenido de fibra en el bagazo desmedulado</b>	<b>96</b>
<b>Figura 28. Gráfica de probabilidad normal para el contenido de fibra en el polvillo</b>	<b>96</b>
<b>Figura 29. Diagrama de cajas para el contenido de fibra en el bagazo desmedulado</b>	<b>97</b>
<b>Figura 30. Diagrama de cajas para el contenido de fibra en el polvillo</b>	<b>97</b>
<b>Figura 31. Representación geométrica del diseño factorial <math>2^2</math> para el contenido de fibra en el bagazo desmedulado</b>	<b>103</b>
<b>Figura 32. Representación geométrica del diseño factorial <math>2^2</math> para el contenido de fibra en el polvillo</b>	<b>104</b>
<b>Figura 33. Representación geométrica del diseño factorial <math>2^2</math> para el contenido de fibra en el rendimiento en remoción de cenizas</b>	<b>104</b>
<b>Figura 34. Efectos de la configuración de cuchillas y la apertura de alimentación de bagazo entero sobre el contenido de fibra en el bagazo desmedulado</b>	<b>107</b>
<b>Figura 35. Efectos de la configuración de cuchillas y la apertura de alimentación de bagazo entero sobre el contenido de fibra en el Polvillo</b>	<b>107</b>
<b>Figura 36. Efectos de la configuración de cuchillas y la apertura de alimentación de bagazo entero sobre el rendimiento en Remoción de cenizas</b>	<b>108</b>

<b>Figura 37. Efecto de interacción AB sobre el contenido de fibra en el bagazo desmedulado</b>	<b>111</b>
<b>Figura 38. Efecto de interacción BA sobre el contenido de fibra en el Polvillo</b>	<b>112</b>
<b>Figura 39. Efecto de interacción BA sobre el rendimiento en remoción de cenizas</b>	<b>112</b>
<b>Figura 40. Verificación de los supuestos para el bagazo desmedulado</b>	<b>116</b>
<b>Figura 41. Verificación de los supuestos para el Polvillo</b>	<b>117</b>
<b>Figura 42. Verificación de los supuestos para la remoción de cenizas</b>	<b>117</b>
<b>Figura 43. Matriz de diseño factorial <math>2^3</math> y su representación geométrica</b>	<b>118</b>
<b>Figura 44. Representación geométrica del diseño factorial <math>3 \times 2 \times 2</math></b>	<b>121</b>
<b>Figura 45. Efectos principales para el contenido de fibra en el bagazo desmedulado</b>	<b>131</b>
<b>Figura 46. Efectos principales para el contenido de fibra en el polvillo</b>	<b>132</b>
<b>Figura 47. Efectos de interacción para el contenido de fibra en el bagazo desmedulado</b>	<b>132</b>
<b>Figura 48. Efectos de interacción para el contenido de fibra en el polvillo</b>	<b>133</b>
<b>Figura 49. Verificación de los supuestos para el contenido de fibra en el bagazo desmedulado</b>	<b>134</b>
<b>Figura 50. Verificación de los supuestos para el contenido de fibra en el polvillo</b>	<b>134</b>
<b>Figura 51. Trazabilidad del Bagazo desmedulado proveniente del central azucarero INCAUCA en el año 2013</b>	<b>135</b>
<b>Figura 52. Trazabilidad del contenido de Fibra en el bagazo entero en el año 2013</b>	<b>135</b>
<b>Figura 53. Comportamiento y tendencia de la fibra en el bagazo desmedulado (Junio – Agosto).</b>	<b>136</b>

<b>Figura 54. Contenido de Fibra en el polvillo rechazado al central azucarero (Junio – Agosto).</b>	<b>136</b>
<b>Figura 55. Comportamiento y tendencia del consumo energético por tonelada de Bagazo entero alimentado (Junio – Agosto).</b>	<b>137</b>
<b>Figura 56. Comportamiento diario y tendencia del rechazo de polvillo al central azucarero (Junio – Agosto).</b>	<b>137</b>

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 1. Resultados de análisis de laboratorio</b>	<b>54</b>
<b>Tabla 3. Resultado del DCA en el bagazo desmedulado</b>	<b>89</b>
<b>Tabla 4. Resultados de DCA en el polvillo</b>	<b>90</b>
<b>Tabla 5. Cálculos para el ANOVA del contenido de fibra en el bagazo desmedulado</b>	<b>92</b>
<b>Tabla 7. Cálculos para el ANOVA del contenido de fibra en el Polvillo</b>	<b>93</b>
<b>Tabla 8. ANOVA - Contenido de fibra en el Polvillo</b>	<b>94</b>
<b>Tabla 9. Aplicación de la prueba LSD al contenido de fibra en el bagazo desmedulado</b>	<b>100</b>
<b>Tabla 10. Aplicación de la prueba LSD al contenido de fibra en el Polvillo</b>	<b>101</b>
<b>Tabla 9. Diseño y datos</b>	<b>103</b>
<b>Tabla 12. Efectos principales (A y B) y de interacción (AB)</b>	<b>106</b>
<b>Tabla 11. Tabla de signos del diseño factorial 2x3</b>	<b>119</b>
<b>Tabla 12. ANOVA para el diseño factorial a x b x c</b>	<b>122</b>

## LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Tabla de la distribución F de Fisher ( $\alpha=0.05$ ) para $1 \leq v_1 \leq 20$	145
Anexo B. Tabla de la distribución F de Fisher ( $\alpha=0.05$ ) para $21 \leq v_1 \leq 1000$	146
Anexo C. Tabla de la t Student para $\alpha/2$	147



## GLOSARIO

**ANÁLISIS DE VARIANZA:** consiste en separar la variación total observada en cada una de las fuentes que contribuye a la misma.

**ARREGLO FACTORIAL:** conjunto de puntos experimentales o tratamientos que pueden formarse al considerar todas las posibilidades de combinación de los niveles de los factores.

**BOXPLOT:** también llamado diagrama de cajas y bigotes, es un gráfico basado en los cuartiles de un conjunto de datos.

**CUADRADOS MEDIOS:** es la suma de cuadrados divididos entre sus respectivos grados de libertad.

**DATO:** es el resultado de las observaciones o mediciones realizadas a cada unidad experimental.

**DESMEDULADO:** es el proceso utilizado para separar la fibra del bagazo de la medula o polvillo.

**DIFERENCIA MÍNIMA SIGNIFICATIVA (LSD):** es la diferencia mínima que debe existir entre dos medias muestrales para considerar que dos tratamientos son diferentes.

**DISEÑO BALANCEADO:** es cuando se utiliza el mismo número de repeticiones en cada tratamiento.

**DISEÑO FACTORIAL:** es un diseño experimental que sirve para estudiar el efecto individual y de interacción de varios factores sobre una o varias variables respuesta.

**DISEÑO FACTORIAL 2<sup>2</sup>:** modelo que estudia el efecto de dos factores considerando dos niveles en cada uno.

**EFFECTO DE INTERACCIÓN:** es el efecto generado por dos factores que interactúan de manera significativa sobre la variable respuesta cuando el efecto de uno depende del nivel en que está el otro.

**EFFECTO DE UN FACTOR:** es el cambio observado en la variable de respuesta debido a un cambio de nivel en el factor.

**EFFECTO PRINCIPAL:** es igual a la respuesta promedio observada en el nivel alto de un factor, menos la respuesta promedio en el nivel bajo.

**FACTOR:** es una variable independiente que se evalúa en la investigación, estos pueden ser observacionales o experimentales.

**GRÁFICA DE PROBABILIDAD:** sirve para verificar visualmente si los datos siguen una distribución de probabilidad específica.

**MUESTRA:** es un subconjunto de la población que contiene información parcial sobre ella.

**NIVEL DE LOS FACTORES:** es cada uno de los atributos o estados en que se descompone un factor.

**NOTACIÓN DE PUNTOS:** sirve para representar sumas y medias que se obtienen a partir de los datos experimentales.

**POBLACIÓN:** es el conjunto de todas las unidades experimentales que podrían recibir uno de los tratamientos. En nuestro caso, es el conjunto de datos que podrían obtenerse de todas las unidades experimentales.

**REGIÓN EXPERIMENTAL:** espacio delimitado por los rangos de experimentación utilizados con cada factor; las conclusiones del experimento son válidas principalmente en esta región.

**RESIDUOS:** son generados por la diferencia entre la respuesta observada y la respuesta predicha por el modelo en cada prueba experimental.

**TRATAMIENTO:** es un nivel de un factor cuando el estudio es unifactorial. En estudios multifactoriales como el presente, un tratamiento es una combinación de niveles tomando uno de cada factor.

**UNIDAD EXPERIMENTAL:** es la parte más pequeña del material experimental a la que se le puede aplicar un tratamiento, es decir, el objeto sobre el cual se realiza una observación o medición.

**VARIABILIDAD:** se refiere al comportamiento fluctuante de las características de calidad.

**VARIABLES DEPENDIENTES E INDEPENDIENTES:** concepto que en el ámbito experimental viene de la idea matemática de relación funcional, donde el cambio de los valores de una variable (dependiente) es el resultado directo del cambio en los valores de otra (independiente).

**VARIABLE RESPUESTA:** es la característica observada o medida en cada unidad experimental.

## RESUMEN

Con el presente trabajo se pretende aplicar el diseño de experimentos para aumentar la remoción de polvillo, trazas e impurezas, aumentando el contenido de fibra útil y mejorando así la eficiencia global del proceso de desmedulado el cual será punto de apalancamiento en la competitividad de la empresa y propósito fundamental en el desarrollo de este proyecto, y determinar el efecto de la apertura de alimentación de bagazo crudo, tipo y cantidad de cuchillas y la dimensión de los agujeros de las cribas, con el propósito de maximizar la eficiencia del proceso de desmedulado. El estudio se realizó en las instalaciones del central azucarero, haciendo uso de dos de las cuatro líneas de desmedulado existentes actualmente, de las que se muestrearon tres elementos como son: bagazo entero, bagazo desmedulado y polvillo; y a cada elemento se le realizó tres tipos de análisis en el laboratorio de bagazo de la empresa productora de pulpa y papel (análisis de humedad, análisis de fibra y análisis de cenizas).

Se planteó una investigación cuantitativa y se hizo uso de herramientas propias para análisis de datos, técnicas de investigación descriptivas y metodologías propias de diseño experimental entre las que se incluyen diseño completo al azar y el diseño factorial. A partir de lo cual se obtuvieron resultados favorables para la empresa papelera debido al enriquecimiento informativo sobre sus procesos y el ahorro económico alcanzado.

**Palabras Clave:** diseño de experimentos, diseño factorial, diseño completamente al azar, proceso de desmedulado, fabricación de pulpa y papel, desmedulado de caña de azúcar.

## INTRODUCCIÓN

Ante el fenómeno de la globalización, es difícil ser competitivo. La competitividad depende especialmente de la calidad de los productos y del nivel de precios. Estos dos factores, en principio estarían relacionados con la productividad, la innovación y la inflación diferencial entre países.

La competitividad permite a la organización mantenerse y permanecer en el mercado a largo plazo, siendo necesario trabajar siempre con innovación de manera que se fomente la apertura de mercados y generación de credibilidad y confianza en la marca, a través del control de calidad y la garantía.

La productividad como base fundamental de la competitividad, es vista como uno de los motores principales para el desarrollo económico de una empresa.

Para una empresa papelera que utiliza en sus procesos fibra corta, en nuestro caso bagazo de caña de azúcar es necesario y esencial la mejora de los procesos del negocio de pulpa y papel para el logro de objetivos realistas en productividad y consecuentemente de competitividad. Bajo estos términos, mejoras en la eficiencia del proceso de Desmedulado, uno de los más importantes dentro de la línea de preparación de fibra contribuiría significativamente a la reducción de costos y por ende a un mejor desempeño operacional desde el punto de vista productivo.

La planta de Desmedulado es la encargada de separar la fibra apta de los otros componentes del bagazo crudo de la caña de azúcar por medio del Proceso de Desmedulado, el cual es un proceso mecánico de separación de materiales en el cual se obtiene el bagazo desmedulado.

La variabilidad del contenido de fibra apta en el bagazo desmedulado, ha generado un aumento en los costos operativos de la línea de producción de pulpa, incidencias ambientales (aglomeración de trazas e impurezas expuestas al medio ambiente) e impactos negativos sobre la calidad del producto. Por lo cual, las fases del proceso de producción deben tener conocimiento sobre la eficiencia de la planta de desmedulado y de los efectos que tiene esta sobre el rendimiento, puesto que la productividad y viabilidad de la empresa parten de este proceso.

Con tal fin de maximizar la eficiencia del proceso de desmedulado, se plantea como objetivos específicos:

- Identificar los tipos y cantidades de impurezas presentes en el bagazo desmedulado por medio de análisis realizados en el laboratorio de bagazo de la empresa papelera.
- Caracterizar el proceso de Desmedulado mediante metodologías, diagramas y figuras que permitan entender el funcionamiento del sistema.
- Experimentar y establecer combinaciones de cuchillas y apertura de alimentación de bagazo entero mediante modelos de diseño experimental, generando conclusiones prácticas que permitan maximizar la eficiencia del proceso de desmedulado.

El documento se ha estructurado a partir del planteamiento del problema en términos del incremento en los costos de producción de papel, con la consecuente disminución de productividad y competitividad en el mercado del papel a causa de la variabilidad del contenido de fibra apta en el bagazo desmedulado, lo que justifica el ejercicio a partir de los antecedentes de los que dispone la empresa papelera; Incorpora un marco teórico con el que se contextualiza el problema, para describir luego, metodológicamente las diferentes etapas de trazabilidad del bagazo, caracterización del proceso de desmedulado y diseño estadístico del experimento.

Esta práctica se desarrolla en virtud del especial interés de la Empresa Papeleira, de avanzar en procura de mejorar la eficiencia del proceso de desmedulado, y el beneficio que de ello podría derivar como pasante de ingeniería en la solución de una problemática industrial de optimización de procesos con herramientas estadísticas, lo que sin lugar a dudas me permitió desarrollar competencias y experiencia laboral.

## 1. ANTECEDENTES

El bagazo de la caña de azúcar está compuesto principalmente por la fibra y la medula o polvillo, este era utilizado en la línea de producción de pulpa y papel tal cual era entregado por parte de los centrales azucareros.

La médula o polvillo es el componente enemigo del proceso de producción de pulpa y papel, además de las trazas o impurezas sumadas a lo largo de los procesos de extracción de jugo de la caña de azúcar que realizan los centrales azucareros, lo cual hace necesario su remoción. Con el fin de alimentar los procesos solamente con fibra y así obtener un papel de mejor calidad.

Anteriormente, se han realizado una serie de ensayos en la planta de desmedulado<sup>1</sup> sin obtener resultados favorables en la remoción de trazas e impurezas del bagazo crudo; resultados inconclusos debido a errores tales como:

- Errores en el muestreo: Debido a la poca información aportada y la ausencia de capacitación a los operarios de turno en la planta de Desmedulado para garantizar variables importantes como tiempo entre muestras, tamaño de muestra y lugar de toma de muestras.
- Errores en los análisis de laboratorio: los procesos y procedimientos de análisis en el laboratorio de bagazo están estandarizados, pero los resultados diversifican según el analista en función y el lapso de tiempo existente entre la toma de la muestra y su análisis.

La empresa productora de papel por décadas ha focalizado su interés en aumentar la eficiencia de la línea de producción. En este sentido, implementó la estación de Desmedulado (Ver Figura No. 1) en la que se realizan tres procesos de limpieza y/o remoción de trazas e impurezas contenidas en el bagazo crudo. (Ver Figura No. 2)

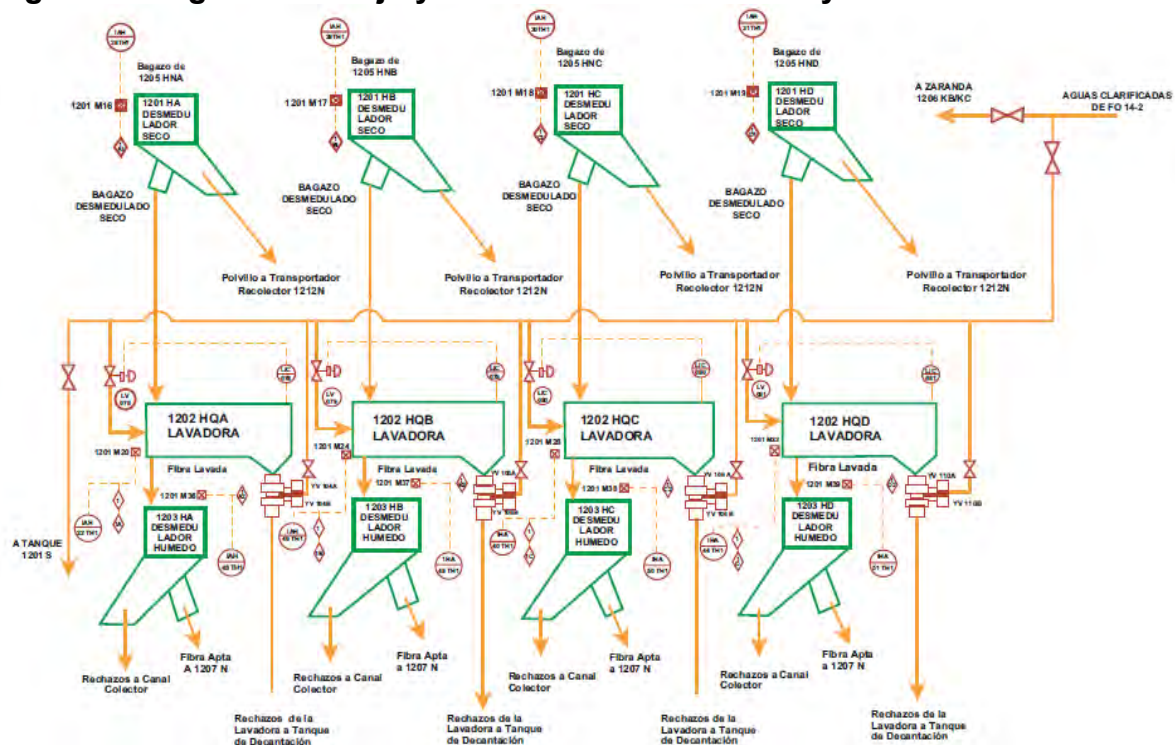
---

<sup>1</sup>BURBANO BANGUERO, Ramiro Andrés. Título: Informe de rendimiento de fibra con cribas de 3/8" y 5/16". Guachené, Agosto 12 de 2010 y Título: Comparativo de fibra de ingenio INCAUCA. Guachené, Agosto 23 de 2010.

**Figura 1. Estación de desmedulado**



**Figura 2. Diagrama de flujo y control de desmedulado y lavado**



**Fuente:** FO 12.2 Manual de Desmedulado. Santiago de Cali, 2013. 1 archivo de computador.



### **1.1. EL PROCESO DE DESMEDULADO EN SECO**

Era el primer proceso al que se sometía el bagazo crudo una vez era entregado por los centrales azucareros, transportado y depositado en los patios de bagazo de la empresa productora de papel (Ver Figura No. 3), consiste en separar la fibra de la medula por medio de un proceso centrífugo que ejecutan los equipos desmeduladores (Ver Figura No. 4).

### **1.2. EL PROCESO DE LAVADO**

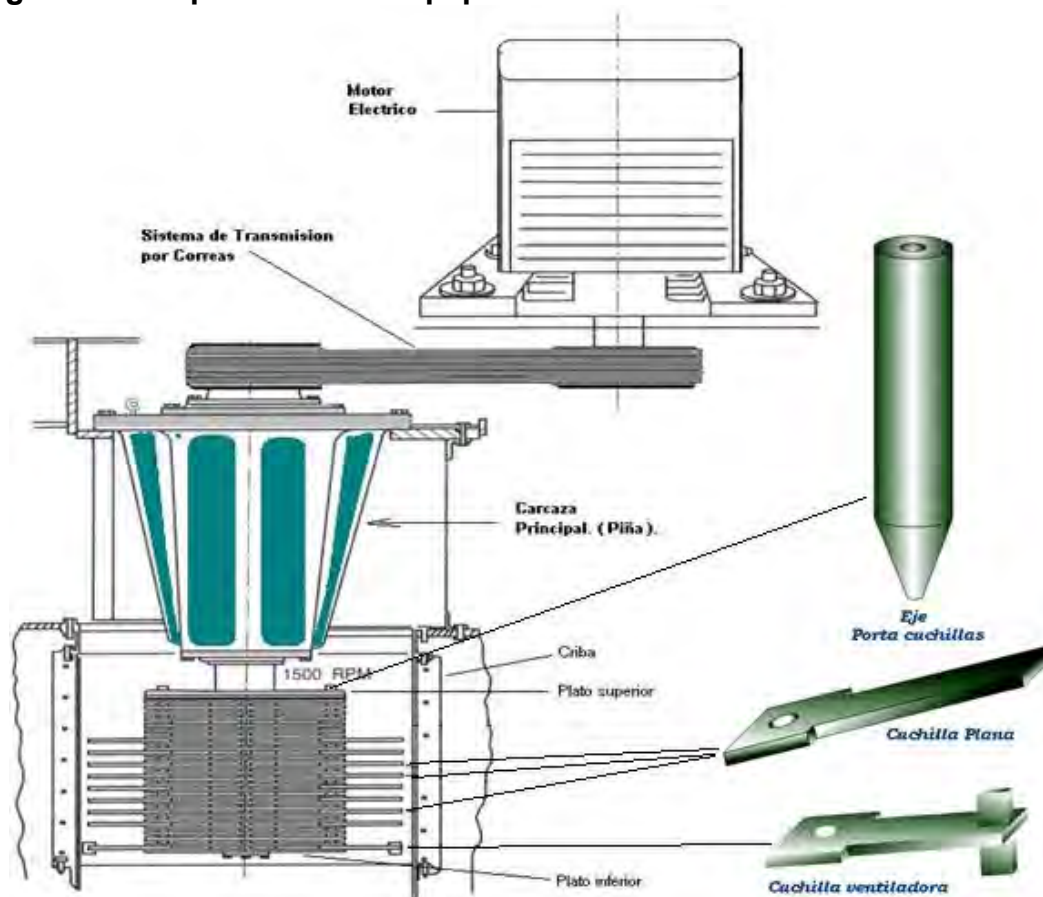
El proceso de lavado se ejecuta en cuatro lavadoras que están compuestas de una tina en forma de U y en su interior trabajan un conjunto de seis rotores para realizar la agitación y generar el avance de la fibra. Existen cuatro tipos de rotores y se diferencian en la configuración de las aspas.

- ✓ Los primeros cuatro rotores tienen las aspas o brazos iguales y son diseñados para hundir la fibra por debajo de la superficie del agua mientras la empuja hacia delante.
- ✓ El segundo tipo de rotor es de brazos desiguales en forma de cono y van en la curva al inicio de la pierna de salida.
- ✓ El tercer tipo de rotor tiene siete aspas longitudinales.
- ✓ El cuarto tipo de rotor está colocado a la salida de la lavadora y es similar al anterior con las aspas más delgadas y en ellas se aseguran láminas de caucho que exprimen la fibra que sale hacia los desmeduladores húmedos. La fibra flota en el agua; las piedras, la arena y otros materiales pesados se precipitan al fondo. (Ver Figura. 5)

**Figura 3. Patio de bagazo de la empresa productora de papel**

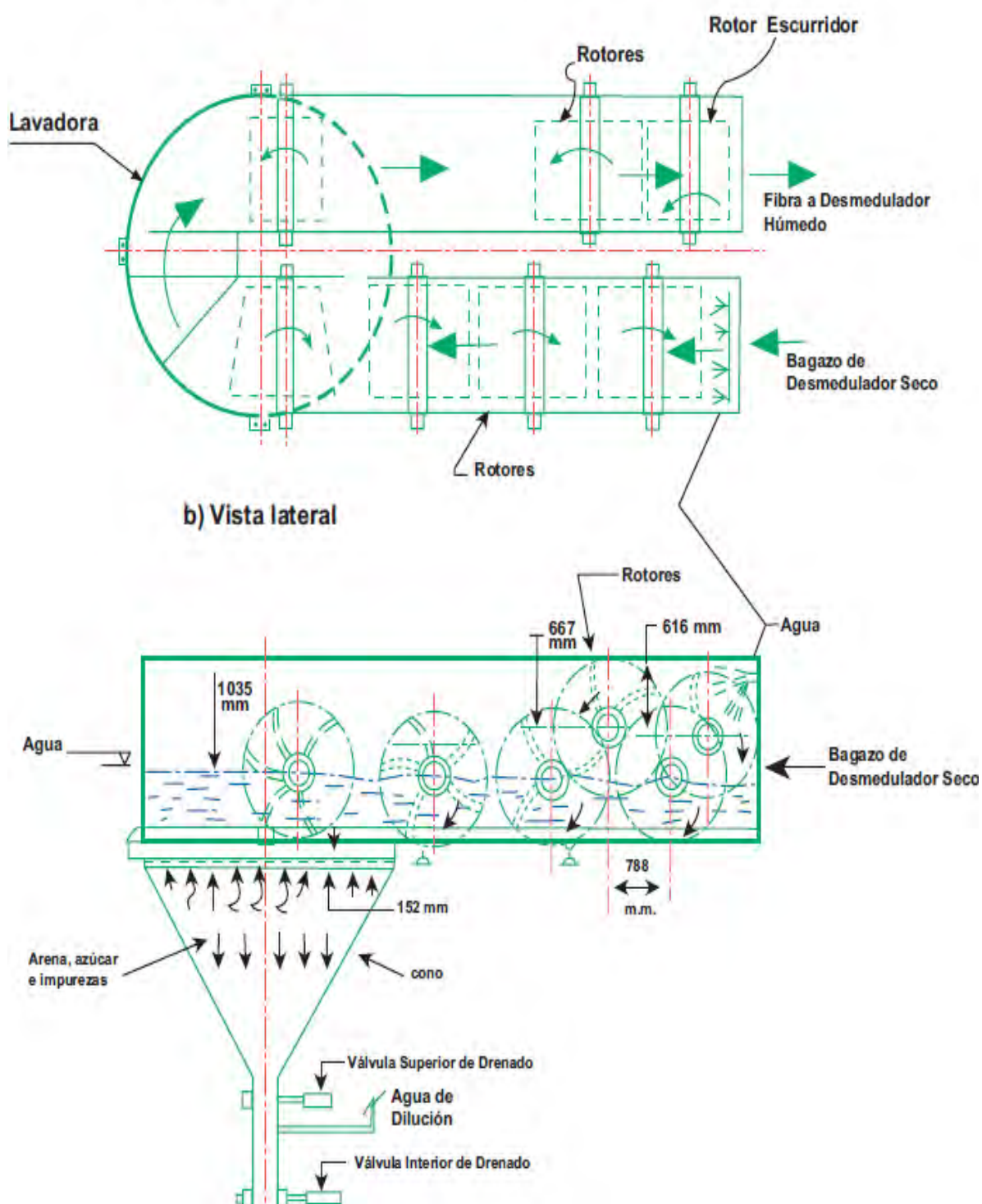


**Figura 4. Componentes del equipo desmedulador**



**Fuente:** Producción de Pulpa 2. Santiago de Cali, 2013. 1 archivo de computador

**Figura 5. Esquema de las lavadoras  
a Vista superior**



**Fuente:** FO 12.2 Manual de Desmedulado. Santiago de Cali, 2013. 1 archivo de computador.

### 1.3. EL PROCESO DE DESMEDULADO EN HÚMEDO

Es el proceso que se utiliza actualmente. En este proceso se alimenta las líneas de desmedulado con el bagazo que sale del proceso de lavado y se desmedula.

La estación de desmedulado generó un aumento en la calidad del papel producido y una reducción en los costos de producción.

La empresa productora de papel realizó estudios y ensayos para la reutilización de las trazas e impurezas con el fin de reducir el impacto ambiental generado. Dicho esto, la empresa efectuó la alimentación de sus calderas con una porción de las trazas generadas e implementó una nueva estación de desmedulado (Ver Figura. 6) en los centrales azucareros para disminuir la cantidad de trazas que se transportan a la empresa. El proceso actualmente presenta variabilidad en el contenido de fibra en el bagazo desmedulado, razón que da pie a la elaboración de este proyecto.

**Figura 6. Planta de desmedulado en el central azucarero**





## 2. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

### 2.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El bagazo es el residuo del proceso de fabricación del azúcar a partir de la caña, el remanente de los tallos de la caña después de ser extraído el jugo azucarado que ésta contiene; se ha empleado tradicionalmente en los países azucareros como materia prima para la producción de energía en las calderas de los ingenios o centrales azucareros y su empleo en la manufactura de papel inició hace más de 15 décadas, además de la fabricación de paneles aglomerados de fibras y de partículas y celulosa para derivados farmacéuticos y aditivos de alimentos. (Rutiaga et al, 2002 y Jiménez, 1997).

Las fibras son el constituyente fundamental del papel y tienen influencia en la resistencia de este producto. Para tener un buen papel tanto desde el punto de vista de su resistencia como de calidad de impresión, es importante que las materias primas fibrosas como el bagazo debe de reunir determinados requisitos de índole técnica como composición química, reactividad frente a los agentes de pulpeo y propiedades anatómico-morfológicas.

Triana (1990) mencionó que el bagazo está constituido por cuatro fracciones: Fibra o bagazo (45 %), sólidos no solubles (2–3%), sólidos solubles (2–3 %) y agua (49 –51%). La fibra está influenciada por las condiciones de procesamiento agrícola de la caña, tipo de corte y recolección, manejo del bagazo y almacenamiento. Desde el punto de vista morfológico está formada por la fibra verdadera y por médula (meollo o parénquima). El desmedulado constituye un paso imprescindible al mejorar el bagazo para la producción de pulpas, aumenta el rendimiento y mejora la blancura y las propiedades de resistencia del papel resultante.

En la actualidad, la empresa productora de papel objeto del presente estudio presenta un incremento en los costos de producción de papel, disminución de productividad y por ende de competitividad en el mercado de papel, a causa de la variabilidad del contenido de fibra apta en el bagazo desmedulado generada por la ineficiencia del proceso de desmedulado. Las fuentes de variabilidad pueden clasificarse en:

**Fuentes Endógenas:** Son factores de variación inherentes al proceso de Desmedulado y por tanto factibles de ser controlados internamente en la planta. Entre estos, merecen especial mención:

- La carga de bagazo crudo o entero (sin procesar) que alimenta el proceso

- El tipo y cantidad de cuchillas (elementos encargados de impactar el bagazo con objeto de abrir la médula y extraer el polvillo) ancladas en el rotor del Desmedulador
- El diámetro de los orificios de las cribas adosadas al Desmedulador
- La velocidad de rotación del motor impulsor

**Fuentes Exógenas:** Son factores de variación externos al proceso de Desmedulado y por tanto variables no controlables desde la gerencia interna. Entre estos, vale la pena mencionar:

- La variación en el tamaño de la fibra, se origina mayormente por el tipo de corte que se realiza a la caña en los campos de siembra, es decir, si el corte de la caña se ha realizado manualmente (por personas) o utilizando maquinaria de corte para ser transportada posteriormente a las instalaciones de los centrales azucareros; y por la implementación de máquinas desfibriladoras en el proceso de extracción de jugo de la caña de azúcar por parte del central azucarero a partir del 14 de Agosto de 2010
- La diversidad de la caña de azúcar, el contenido de fibra en el bagazo crudo se ve influenciada por la mezcla de las diferentes variedades de cañas de azúcar cultivadas y procesadas, cada una de estas con propiedades físico-químicas semejantes y otras muy propias de cada variedad.
- Las condiciones del terreno en el momento del corte, dado que si por condiciones climáticas el terreno se encuentra mojado, la caña de azúcar transportada al central azucarero lleva mayor contenido de cenizas.
- El lavado de la caña de azúcar, el central azucarero no realiza un lavado a toda la caña que llega a sus instalaciones, ni ejerce control y/o registro sobre los lotes a los que se les aplica el lavado; cabe resaltar que solo se le hace lavado a la caña de azúcar que es reportada como “sucía” por parte de los operarios de turno en los terrenos de corte y este lavado afecta el contenido de cenizas en el bagazo crudo.
- El ajuste de las masas de molienda. En la línea de producción de los centrales azucareros, la caña de azúcar es sometida a diferentes presiones en aras de una mayor extracción de su jugo. Posibles fallas de ajuste y/o funcionamiento de estas masas de molienda influyen el contenido de humedad en el bagazo crudo.

- El inconstante suministro de bagazo crudo, el cual no permite uniformidad de carga en el proceso.
- El aumento del contenido de humedad en el bagazo crudo, que ocasiona atascamiento de las líneas de desmedulado y por ende improductividad.

El proceso de desmedulado es el primer proceso de la fabricación de pulpa y papel. En este proceso los desmeduladores son alimentados del bagazo entero proveniente del central azucarero, el producto resultante debe ser bagazo desmedulado con un contenido de fibra mínimo de 67%, y el subproducto debe ser un polvillo con un contenido de fibra máximo de 21%.

El principal problema de este proceso es que los niveles del contenido de fibra en el bagazo desmedulado se encuentran muy por debajo de los requeridos.

El registro de mediciones en los últimos 2 años indica que el contenido de fibra se encuentra entre 63 y 65% en el bagazo desmedulado.

Con el presente proyecto se pretende intervenir en las causas endógenas bajo la gobernabilidad de la gerencia de la empresa, con el desarrollo de diseños experimentales que permitan analizar y conocer el comportamiento del proceso de desmedulado al cambiar la estructura funcional de los equipos desmeduladores, respecto a la carga de alimentación de bagazo crudo, la limpieza y el tamizado de la fibra dentro del proceso, modificando la apertura de alimentación de bagazo entero, la configuración de cuchillas y el diámetro de los orificios de las cribas adosadas a los equipos desmeduladores, respectivamente; Para aumentar la eficiencia del proceso de desmedulado.

### 3. JUSTIFICACIÓN

La empresa productora de papel en el propósito de estar a la vanguardia en el mercado de fabricación de pulpa y papel, entiende que quizá uno de los factores más importante a revisar y ajustar es el proceso de desmedulado de la materia prima, el cual constituye un paso impostergable para mejorar la calidad del bagazo usado en la producción de papel, aumentar el rendimiento, mejorar la blancura y las propiedades de resistencia del papel resultante.

La variabilidad presentada actualmente en la materia prima debido a la ineficiencia del proceso de desmedulado afecta drásticamente la calidad del producto final y mantenerla implica el desarrollo de actividades que consumen recursos como tiempos y costos, generando improductividad y vulnerando la competitividad de la empresa en el mercado doméstico e internacional de pulpa y papel.

Por las anteriores razones, dentro de sus objetivos estratégicos, la empresa papelera tiene como prioridad la realización de un proyecto encaminado al mejoramiento de la calidad del proceso de Desmedulado con el propósito de obtener una fibra de bagazo de caña de azúcar con características superiores en términos de contenido, limpieza y homogeneidad, disponiendo para ello de los recursos tecnológicos del proceso y absorbiendo los costos que el trabajo experimental demande.

Los agentes beneficiados con la realización y posterior aplicación de los resultados de este proyecto son:

- **LA EMPRESA:** Mejorando la eficiencia del proceso de desmedulado al obtener una fibra de bagazo de caña con mayor contenido útil, lo cual representa una reducción de costos en la utilización de fibra para la fabricación de papel. Con ello la empresa consumirá más fibra local y demandará menos consumo de fibra importada; Igualmente, la empresa se beneficiará al reducir la generación de impurezas, las cuales por sus propiedades no reutilizables forman aglomeraciones dentro de la planta que de hecho se encuentran expuestas al medio ambiente, ocupando innecesariamente espacio y generando condiciones de riesgo debido a su carácter carburante.
- **EL ESTUDIANTE:** Es el segundo beneficiado al tener la oportunidad de aplicar elementos teóricos del curriculum de ingeniería en la solución de una problemática industrial de optimización de proceso con herramientas estadísticas, desarrollando competencias y experiencia laboral en el área de Gestión y Control Estadístico de Calidad, mediante la modalidad de pasantía, condición necesaria para optar el título de Ingeniero Industrial.



## **4. OBJETIVOS**

### **4.1. OBJETIVO GENERAL**

Aplicar el diseño de experimentos para determinar el efecto de la apertura de alimentación de bagazo crudo, tipo y cantidad de cuchillas con el propósito de maximizar la eficiencia del proceso de desmedulado.

### **4.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS**

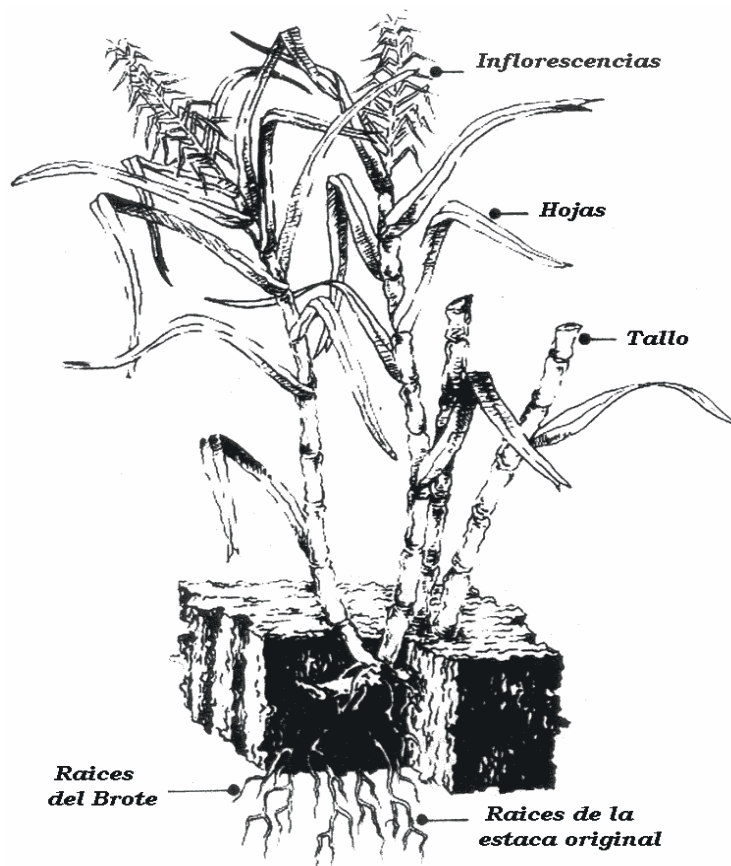
- Identificar los tipos y cantidades de impurezas presentes en el bagazo desmedulado por medio de análisis realizados en el laboratorio de bagazo de la empresa papelera.
- Caracterizar el proceso de Desmedulado mediante metodologías, diagramas y figuras que permitan entender el funcionamiento del sistema.
- Experimentar y establecer combinaciones de cuchillas y apertura de alimentación de bagazo entero mediante modelos de diseño experimental, generando conclusiones prácticas que permitan maximizar la eficiencia del proceso de desmedulado.

## 5. MARCO DE REFERENCIA

### 5.1. MARCO TEÓRICO

**5.1.1. La caña de azúcar.** La caña de azúcar pertenece a la familia de las gramíneas, tiene el tallo leñoso de uno (1) a dos (2) metros de altura y está lleno de un tejido esponjoso y dulce del que se extrae el azúcar. Posee hojas largas, lampiñas y flores purpúreas en panoja piramidal. (Ver Figura. 7)

**Figura 7. Caña de azúcar**



**PLANTA DE LA CAÑA DE AZUCAR**

**Fuente:** Producción de pulpa 2. Santiago de Cali, 2013. 1 archivo de computador

La sección transversal del entrenudo muestra desde la periferia hacia el centro del tallo los siguientes tejidos: epidermis, cortezas o cáscara, haces fibro-vasculares y tejido parenquimatoso.

La epidermis es una capa fina que recubre todo el tallo y lo protege, actúa como impermeabilizante con relación a la solución azucarada. En ella abundan componentes químicos no fundamentales de la caña de azúcar, como ceras, taninos, entre otros y que luego aparecen clasificados en el bagazo como extractivos.

La corteza o cáscara está compuesta por fibras muy lignificadas cuyas características principales son su ancho de pared celular, su longitud y rigidez. Estas propiedades las hacen muy adecuadas para proteger al tallo de los efectos mecánicos externos y su función fundamental es servir de sostén a la planta.

Las fibras de la corteza se agrupan en capas concéntricas predominando las esclerenquimatosas, siendo estas por excelencia las más adecuadas para la industria papelera.

La caña de azúcar es utilizada en la industria para la fabricación de azúcares, mieles y alcoholes. Cuyos procesos generan el bagazo de caña de azúcar, que es el remanente de los tallos luego de ser extraído el jugo azucarado que esta contiene.

La experiencia industrial acumulada en los años más recientes, han demostrado la viabilidad de satisfacer las demandas energéticas de los centrales azucareros, con prácticamente la mitad de su bagazo, quedando un sobrante factible de ser empleado en más de cuarenta aplicaciones demostradas, de las cuales las más relevantes son la producción de celulosa y papel, tableros, etanol, alimento animal.

Para la producción de papel se requiere retirar la médula (polvillo) que trae consigo el bagazo, separación que se realiza en equipos desmeduladores, proceso al cual se le llama desmedulado.

El proceso de desmedulado en la industria se realiza en algunos tipos de desmeduladores, los cuales se emplean para extraer la fibra de coco, la fibra de hojas de Agaves y fibra de caña de azúcar.

**5.1.2. El desmedulador.** En la actualidad existen diferentes tipos de desmeduladores, de los cuales tenemos:

Los desmeduladores de fibra de hojas de Agaves, el proceso consiste en acercar la hoja del agave a un tambor rotatorio que cuenta con diversos tipos de agujas o elementos puntiagudos apuntando hacia el exterior, estos abren la penca y barrer las fibras a lo largo de ella, retirando la médula y liberando las fibras de esta.

El desmedulador de bagazo de caña de azúcar (objeto de estudio), consiste en un eje vertical al que se adhieren cuchillas y una criba (la cual envuelve el eje y las cuchillas), al introducir el bagazo de la caña de azúcar por una tolva este entra en contacto con las cuchillas que al golpearlo lo abren, retirando la médula hacia la criba. La acción de la fuerza centrífuga y la presión del aire generada por las cuchillas a gran velocidad (aproximada de 1500 rpm), producen la expulsión de la médula hacia una cámara exterior por entre los agujeros de la criba. El desmedulador tiene dos salidas, una para la médula o polvillo y una para la fibra apta.

**5.1.3. Diseño de experimentos o DOE.** En la industria es frecuente la realización de ensayos, pruebas, experimentos con el propósito de resolver un problema, probar una hipótesis o lograr una mejora.

Usualmente esto se lleva a cabo efectuando cambios en materiales, métodos o condiciones de operación. Los cambios se realizan hasta resolver el problema o encontrar un mejor resultado.

Lo cuestionable de esta metodología es que se hace sobre la marcha, utilizando el criterio de ensayo y error, apoyándose en la experiencia y la intuición, es decir, sin ningún plan experimental que garantice resultados. En la generalidad de los casos, no se analiza la variabilidad, o el análisis es superficial, intuitivo y no riguroso. En muchos casos, no se documentan los cambios y resultados, ni existe memoria del trabajo realizado.

Por otro lado, existe la opción propia de ingeniería basada en el Diseño Estadístico de experimentos, que se inicia construyendo un plan experimental y que permite obtener resultados confiables en un tiempo relativamente corto y con pocos recursos, constituyéndose esta metodología en la forma más eficaz de realizar pruebas y ensayos a nivel industrial.

Según George Wald (1987), “La experimentación es el mecanismo para hacer que la naturaleza hable inteligiblemente”<sup>2</sup>.

---

<sup>2</sup> DIAZ, Abel. “Diseño estadístico de experimentos, 2 edición Medellín: U. de Antioquia. 1999. p 8

**5.1.3.1. Historia.** El diseño de experimentos es esencialmente una estrategia para la planificación de experimentos de manera tal que las conclusiones relevantes sean alcanzadas en forma eficiente y económica. La selección del plan específico es dependiente del tipo de preguntas a ser respondidas, el grado de generalidad a vincularse a las conclusiones y los recursos disponibles (material experimental, personal, tiempo).

En los últimos años, la aplicación del diseño experimental ha florecido notablemente debido al reconocimiento que los experimentos diseñados son esenciales para la mejora de la calidad de productos y servicios. Además el gerenciamiento del control estadístico de calidad, resuelve la inspección y otras herramientas de calidad que también sirven para esta función, el diseño de experimentos representa la metodología de la elección de marcos complejos, variables e interacciones. Históricamente, el diseño de experimentos ha evolucionado y prosperado en las áreas agrícolas. La medicina también ha disfrutado una larga historia de diseños experimentales cuidadosos. Rutinariamente, los procesos industriales son testigos de los beneficios considerables de esta metodología, debido a la facilidad para iniciar esfuerzos (paquetes informativos amigables para el usuario), mejoras en el entrenamiento, apoyan las influencias y sucesos acumulativos del diseño de experimentos<sup>3</sup>.

El DOE tuvo su inicio teórico a partir de 1935 por Ronald Aylmer Fisher quien discutió en 1926, que los diseños “complejos” como diseños factoriales, eran más eficientes que estudiar un factor a la vez<sup>4</sup>; presentó la base de la teoría del Diseño Experimental y que a la fecha se encuentra bastante desarrollada y ampliada. No obstante, años atrás ya se realizaban ejercicios basados en la experimentación, por ejemplo:

- La experimentación controlada del Escorbuto. En 1947, por el cirujano James Lind, quien trabajaba en un experimento controlado para desarrollar la cura para el escorbuto.
- En 1800, Charles S. Peirce desarrolló publicaciones<sup>5</sup> basadas en la asignación al azar de secuencias.

---

<sup>3</sup> NAPOLITANO, Horacio. Título: Diseño de experimentos. En: Educación en Ciencias Químicas – Industria & Química. N° 354. p62

<sup>4</sup> FISHER AYLMEER, Ronald. Título: The Arrangement of Field Experiments. [en línea] En: Journal of the Ministry of Agriculture of Great Britain 33: p 503–513. Gran Bretaña, 1926. [consultado 15 de marzo de 2013]  
<http://digital.library.adelaide.edu.au/coll/special/fisher/48.pdf>.

<sup>5</sup> CHARLES, Peirce. Título: Ilustraciones de la lógica de la ciencia, 1878 y Título: Teoría de la inferencia probable, 1883.p5

Actualmente las aplicaciones son múltiples, especialmente en la investigación de las ciencias naturales, ingeniería, laboratorios y casi todas las ramas de las ciencias sociales.

**5.1.3.2. El diseño de experimentos y sus avances en el tiempo.** Los primeros trabajos correlativos con el diseño de experimentos datan de 1800, cuando Charles S. Peirce presentó una publicación sobre la “asignación al azar de secuencias”, en las que proponía la distribución de unidades experimentales a través de la asignación aleatoria a un tratamiento.

Posteriormente en 1947, el cirujano James Lind, trabajó en un “experimento controlado” para desarrollar la cura contra el escorbuto aplicando seis tratamientos diferentes a seis pares de pacientes afectados por la enfermedad. De los seis tratamientos, uno resultó eficaz 100% para curar la enfermedad.

Sin embargo fué en 1935 cuando el DOE tuvo su verdadero inicio teórico-práctico con Sir Ronald Aylmer Fisher quien trabajaba como estadístico en una estación de investigación agrícola experimental en Rothamsted, Inglaterra.

Basándose en sus experiencias, publicó los primeros conceptos sobre el tema en su libro “The Design of Experiments”. En dicha publicación presentó la base teórica del diseño experimental y que a la fecha se encuentra bastante desarrollada y ampliada. Fisher aportó métodos para realizar investigaciones agrícolas con muestras pequeñas, e introdujo la metodología para procesar los resultados de los experimentos bajo esas condiciones. Esta fase del desarrollo del diseño experimental se conoce como la era agrícola.

Fisher fue el primero en reconocer que la forma de realizar un experimento, puede entorpecer el correcto análisis e interpretación de los resultados experimentales.

A Fisher se atribuye las ideas claves que posteriormente se convirtieron en los principios básicos del diseño experimental: aleatorización, replicas, y bloqueo.

Los últimos desarrollos de Fisher estuvieron relacionados con la metodología para realizar diseños experimentales en que intervienen en forma simultánea varios factores. Demostró que estos diseños clasificados como complejos y que hoy corresponden a los diseños factoriales, son más eficientes que aquellos diseños en que se estudia un factor a la vez. Finalmente a Fisher se le atribuye aparte del diseño factorial (tal como se utiliza hoy día) el análisis de varianza,

condición que debe ser constante para los distintos tratamientos y que es un supuesto demostrable en los diferentes tipos de diseño.

La siguiente fase de desarrollo en el diseño de experimentos es conocida como la era industrial (1950), siendo sus mayores exponentes George P. Box quien trabajó como estadístico en la industria química y Wilson quienes desarrollaron la metodología de la Superficie de Respuesta (RSM) la cual establece una relación funcional gráfica entre la respuesta del experimento y los factores que intervienen. Estos investigadores encontraron que muchos experimentos en el campo agrícola son sensiblemente diferentes a los experimentos industriales en dos aspectos: la variable respuesta es cuantificada de forma inmediata y el experimentador puede obtener información relevante con un pequeño número de corridas.

Para 1950 el cuerpo de conocimientos propios del diseño experimental ya estaba construido y hasta 1980 fue la herramienta por excelencia utilizada en Investigación & Desarrollo. En realidad, no había aplicación de esta temática a nivel de planta industrial o manufactura, y las razones fueron obvias: los ingenieros de aquellas épocas poco o nada conocían de estadística y adicionalmente no existían herramientas computacionales apropiadas ni software para los pesados cálculos que demanda el diseño experimental.

A finales de la década de los 70 aparece la tercera etapa del diseño experimental conocida como la era Taguchi. Los desarrollos de Genichi Taguchi y Kackar tuvieron un impacto significativo en el uso del diseño experimental. Estos personajes introdujeron el llamado “diseño paramétrico robusto” el cual es insensible al ruido (factores no controlables) y permite alcanzar una media deseada con una variabilidad mínima.

En la década de 1980 los gerentes de las compañías occidentales empezaron a percibir los logros japoneses con esta herramienta y fue así como se empezaron a capacitar ingenieros en estadística básica y diseño experimental. De hecho, muchas universidades empezaron a ofrecer diseño experimental en sus currículos de ingeniería. El diseño paramétrico, y los diseños factoriales fraccionados introducidos por Taguchi despertaron en occidente un cúmulo de discusiones y controversias que se resumieron en mayo de 1992 en el panel de discusión conocido como Technometrics, realizado con el patrocinio de AT&T y donde participaron estadísticos de diversas universidades como Waterloo, Wisconsin, Imperial College, Florida entre otras.

De este panel se derivaron dos conclusiones importantes:

Primero, el uso del diseño de experimentos se generalizó en industrias de piezas discretas incluyendo la automotriz, la aeroespacial y la electrónica y otras como la química y segundo, la integración del diseño experimental en los programas de ingeniería y su aplicación se ha convertido en un factor clave para el desarrollo y mejora de la competitividad industrial.

Actualmente el diseño experimental es conceptualmente el mismo de la época de Fisher, con la gran diferencia que no utiliza la terminología de parcela ni la connotación agrícola de aquella época. El vocabulario es moderno: tratamiento, nivel, factor, respuesta, unidad experimental, réplica, notación de Yates, efectos etc. Las aplicaciones son múltiples, especialmente en la industria, en investigación de las ciencias naturales, ingeniería, farmacología, laboratorios y casi todas las ramas de las ciencias sociales.

**5.1.3.3. La estrategia y metodología.** La experimentación proporciona los datos experimentales, en contraste con los datos de la observación; los datos de la observación se representan como su nombre indica por observaciones de las unidades elementales de una población o de una muestra, y no deben ser cambiados ni modificados por ningún intento de parte de un investigador en el curso de la observación.

El análisis descriptivo y exploratorio de datos ayuda en el reconocimiento del problema y en el planteamiento de las hipótesis; el diseño estadístico de experimentos, el muestreo y los estudios de laboratorio aportan las bases para la planeación, recolección de datos y validación de la información en la contrastación de las hipótesis, estimaciones y conclusiones.

El plan experimental permite definir qué variables afectan la respuesta del proceso que se quiere mejorar, que pruebas se realizarán, cuántas veces se ejecutara el experimento básico, de qué manera se correrán las pruebas, e incluye el procesamiento estadístico de los datos para obtener los mejores resultados.

El diseño de experimentos igual a muchas estrategias de optimización y de mejora continua, siguen el llamado ciclo de Deming, que consiste en cuatro pasos, que en su contexto se describe así,

✓ **Planear** un experimento. Parte de definir y entender el problema o el objetivo que se busca al experimentar, ya que esto depende el éxito del mismo. Por lo tanto es necesario asignar un título al estudio que indique la intención general del mismo, en la descripción del problema destacar los argumentos de la importancia que conlleva realizarlo, definir indicadores que permitan medir el éxito del experimentos, precisar las variables de salida, los parámetros de



operación y de entrada del proceso, seleccionar los factores y sus niveles de manera adecuada, elegir las variables de respuesta y verificar que son medidas de manera confiable, seleccionar el diseño experimental que mejor se ajusta a los factores y al objetivo del experimento, organizar el trabajo experimental, es decir, diseñar una hoja de trabajo en la que se indiquen las pruebas a realizar, el orden en que se ejecutaran, las personas involucradas, las indicaciones a seguir a lo largo del experimento y prever las posibles contingencias así como las acciones en el evento en que ocurran.

✓ **Hacer** corridas experimentales. Aplicar el plan previsto en la etapa de planeación.

✓ **Verificar** datos. Hacer un análisis detallado de los resultados, verificar los supuestos y determinar el mejor tratamiento para las variables respuestas.

✓ **Actuar** y Confirmar. Realizar corridas de confirmación de resultados para obtener representatividad de las características del proceso de desmedulado en el mejor tratamiento que permitan la estandarización del mismo.

El DOE Se considera como un conjunto de técnicas activas para manipular racionalmente variables del proceso y lograr los mejores resultados, de las cuales en el desarrollo del presente proyecto se utilizarán diseños completamente aleatorizados (DCA) y diseños factoriales.

Los experimentos factoriales proporcionan una metodología para estudiar las interrelaciones entre los factores múltiples de interés para el experimentador. Este tipo de experimentos es mucho más eficiente y efectivo que los experimentos intuitivos “un factor cada vez”.

Según Napolitano,

“Mirando el diseño de experimentos como un proceso evolutivo teniendo como objetivo la mejora continua, los diseños de superficie de respuesta juegan un rol fundamental. Considerando niveles múltiples de los actores claves, los métodos de superficie de respuesta, acomodan los efectos curvilíneos en la vecindad de los puntos óptimos”<sup>6</sup>.

---

<sup>6</sup> NAPOLITANO, Horacio. Título: Diseño de experimentos. En: Educación en Ciencias Químicas – Industria & Química. N° 354. p68

☑ **Diseño completamente al azar.** En el Diseño de Experimentos al Completo Azar, el experimentador asigna las unidades experimentales a los tratamientos al azar, con la única restricción del número de observaciones que se tomarán en cada tratamiento. Es el más sencillo y se origina por la asignación aleatoria de tratamientos a un conjunto de unidades experimentales.

El diseño al completo azar se utiliza cuando las condiciones del sitio o lugar experimental son totalmente homogéneas.

Sea  $n_i$  el número de observaciones en el  $i$ -ésimo tratamiento,  $i = 1, \dots, I$ . Entonces, los valores  $n_1, n_2, \dots, n_I$ , determinan por completo las propiedades estadísticas del diseño. Naturalmente, este tipo de diseño se utiliza en experimentos que no incluyen factores bloque. El modelo matemático es de la forma:

$$\text{Respuesta} = \text{Constante} + \text{Efecto tratamiento} + \text{Error}.$$

El diseño al completo azar tiene varias ventajas y desventajas entre estas se pueden mencionar las siguientes:

#### **Ventajas:**

✓ Su sencillez (estadístico fácil). Aun cuando el dato de algunos tratamiento se hayan perdido, o rechacen por alguna causa el método de análisis sigue siendo sencillo. La pérdida relativa de información debida a los datos faltantes, es de menos importancia que en cualquier otro sistema.

✓ La flexibilidad. Puede utilizarse cualquier número de tratamientos y repeticiones, y pueden variar a voluntad del investigador el número de repeticiones de un tratamiento a otro, pero no es recomendable sino existe una buena razón. Todo el material experimental disponible puede usarse, lo cual es una ventaja en experimentos preliminares pequeños donde el material experimental de que se dispone es escaso.

✓ El número de grados de libertad es máximo en comparación con otros modelos, el modelo estadístico sigue siendo fácil aun cuando se pierdan unidades experimentales.

### **Desventajas:**

- ✓ Otro diseño suele ser capaz de estimar el error estándar por unidad experimental (error experimental) con un mayor grado de precisión.
- ✓ No siempre puede garantizarse condiciones de homogeneidad. No se asegura ninguna forma para aseverar que las unidades reciben un tratamiento similar a aquellas que reciben otro tratamiento, toda la variación que existe entre las unidades pasa a formar parte del error experimental.

**Aleatorización,** Se debe aleatorizar para transformar la variabilidad sistemática no planificada en variabilidad no planificada o ruido aleatorio, es decir, para prevenir la introducción de sesgos en el experimento.

La aleatorización evita la dependencia entre observaciones y valida muchos de los procedimientos estadísticos más comunes, esta es apropiada:

- ✓ Si el material experimental es homogéneo.
- ✓ Cuando es probable que una parte apreciable de las unidades se destruyan o no respondan.
- ✓ En experimentos pequeños en donde la mayor precisión de otros diseños no compensa la pérdida de grados de libertad del error.

### **Procedimiento de análisis**

a. Determinar el número de unidades experimentales ( $n$ ) y numerarlas. Es posible obtener " $n$ " al multiplicar el número de tratamientos por el número de repeticiones  $n = (t * r)$ .

b. Asignar el número de unidades experimentales a cada tratamiento utilizando una tabla de números aleatorios o bien cualquier otra herramienta que sirva para el mismo propósito. Por ejemplo si cada tratamiento ha de repetirse cuatro veces, los primeros cuatro números aleatorios obtenidos se asignarán al tratamiento A, los siguientes cuatro números aleatorios al tratamiento B, y así sucesivamente.

c. Una vez hecha la distribución anterior (liberal b) se numeran las unidades experimentales y se localizan los tratamientos de acuerdo al número que les corresponde y se obtiene así la distribución de campo.

### Modelo Estadístico

$$Y_{ij} = \mu + t_i + \varepsilon_{ij}$$

Donde,

$Y_{ij}$ : Variable respuesta de la ij-esima unidad experimental

$\mu$ : Efecto de la media general

$t_i$ : Efecto del i-esimo tratamiento

$\varepsilon_{ij}$ : Efecto del error experimental asociado a la i-esima unidad experimental

### Análisis de Varianza

✓ Hipótesis Nula [ $H_0$ ]:  $t_i = 0$  (Los i tratamientos tienen el mismo efecto sobre la variable en estudio).

✓ Hipótesis alternativa [ $H_a$ ]:  $t_i \neq 0$  (No todos los tratamientos tienen el mismo efecto sobre la variable en estudio, al menos uno produce un resultado distinto).

**Registro de datos**, Los datos obtenidos a partir de un diseño completamente al azar se registran como se muestra en el siguiente cuadro.

**Cuadro 1. Registro de Datos de un DCA**

Tratamientos	Repeticiones					$Y_{i.}$
	1	2	3	4	r	
1	$Y_{11}$	$Y_{12}$	$Y_{13}$	. . .	$Y_{1r}$	$Y_{1.}$
2	$Y_{21}$	$Y_{22}$	$Y_{23}$	. . .	$Y_{2r}$	$Y_{2.}$
3	$Y_{31}$	$Y_{32}$	$Y_{33}$	. . .	$Y_{3r}$	$Y_{3.}$
.	.	.	.	. . .	.	.
.	.	.	.	. . .	.	.
.	.	.	.	. . .	.	.
r	$Y_{t1}$	$Y_{t2}$	$Y_{t3}$	. . .	$Y_{tr}$	$Y_{..}$

**Supuestos,** Los supuestos que validan el análisis varianza son:

- ✓ Los errores son independientes.
- ✓ Los errores están normalmente distribuidos con media cero y varianza constante.
- ✓ Existe homogeneidad de varianza entre los tratamientos.

**Fuentes de variación y grados de libertad,** Para el análisis de varianza se construye una tabla de análisis de varianza y se completan los datos. Existen sólo dos fuentes de variación en el diseño completamente al azar, el error experimental que es la variación entre unidades experimentales dentro de un tratamiento, y la variación entre las medias de los tratamientos.

**Tabla de Análisis de Varianza,** La tabla de la ANOVA está dada por,

**Cuadro 2. Tabla de la ANOVA**

ANOVA - BAGAZO DESMEDULADO				
Fuente de variabilidad	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F0
TRATAMIENTOS	SC	k-1	$M Ct = SC/(k-1)$	$F = M Ct/M Ce$
ERROR	SCE	N-k	$M Ce = SCE/(N-k)$	
TOTAL	SCT	N-1		

Donde,

SC: es la suma de cuadrados de los tratamientos.

SCE: es la suma de cuadrados del error.

SCT: es la suma total de cuadrados.

k: corresponde al número de repeticiones en cada tratamiento.

N: es el número total de datos del DCA.

M Ct: es el cuadrado medio de los tratamientos.

M Ce: es el cuadrado medio del error.

F: es el valor de F calculado.

### Regla de Decisión

Rechazar la hipótesis  $H_0$  si,  $F_c > F_t$  ( $G_{lt}$ ,  $G_{le}$ ,  $\alpha$ ).

Aceptar la Hipótesis  $H_a$  si,  $F_c < F_t$  ( $G_{lt}$ ,  $G_{le}$ ,  $\alpha$ ).

Donde,

Fc: es el F calculado en la tabla de la ANOVA  
Ft: es el valor de la tabla F student.  
Glt: corresponde a los grados de libertad de los tratamientos  
Gle: corresponde a los grados de libertad del error

Según Scheffe (1959), “El análisis de varianza es una técnica estadística para analizar mediciones que dependen de varias clases de efectos que operan simultáneamente, para estimar los efectos y para decidir cuales efectos son importantes”.

Para Ronald Aylmer Fisher (quien ideó el ANOVA y lo publicó en 1923), el análisis de varianza es una técnica estadística que permite analizar datos provenientes de un experimento aleatorio comparativo y comprende un conjunto de procedimientos que se ajustan a las características del diseño experimental usado en la obtención de los datos.

☑ **Diseños factoriales.** Los experimentos factoriales  $2^n$ , que son experimentos de n factores cada uno con dos niveles. Estos experimentos permiten analizar un número grande de factores a la vez, con el objeto de tamizar o seleccionar aquellos que muestran mayor influencia en la variable de respuesta.

Muchos experimentos se llevan a cabo para estudiar los efectos producidos por dos o más factores. Ningún factor se considera extraño; todos tienen el mismo interés. En el experimento factorial o arreglo factorial, se investigan todas las posibles combinaciones de los niveles de los factores en cada ensayo completo o réplica del experimento. El experimento factorial afecta al diseño de tratamientos, que se refiere a la elección de los factores a estudiar, sus niveles y la combinación de ellos. Se debe tener en cuenta que el diseño de tratamientos es independiente del diseño experimental, que indica la manera en que los tratamientos se aleatorizan en las diferentes unidades experimentales y la forma de controlar la variabilidad natural de las mismas. No es usual tener diseños experimentales muy complicados en los experimentos factoriales por la dificultad que involucra el análisis y la interpretación.

### **Razones para estudiar conjuntamente varios factores**

✓ Encontrar un modelo que describa el comportamiento general del fenómeno en estudio. Por ello son muy usados en experimentos exploratorios.

- ✓ Optimizar la respuesta o variable dependiente; es decir, encontrar la combinación de niveles que optimizan la variable dependiente.
- ✓ La característica general y esencial que hace necesario el estudio conjunto de factores es que el efecto de un factor cambie según sean los niveles de otros factores o sea que exista interacción.

### Ventajas de los Experimentos Factoriales

- ✓ Economía en el material experimental ya que se obtiene información sobre varios factores sin incrementar el tamaño del experimento.
- ✓ Permitir el estudio de la interacción, o sea determinar el grado y la forma en la cual se modifica el efecto de un factor por los niveles de otro factor.

### Desventajas de los Experimentos Factoriales

Una desventaja de los experimentos factoriales es que requieren un gran número de tratamientos, especialmente cuando se tienen muchos factores o muchos niveles de un mismo factor. Este hecho tiene los siguientes efectos:

- Si se desea usar bloques completos es difícil encontrar grupos de unidades experimentales homogéneas para aplicar todos los tratamientos.
- Se aumenta el costo del experimento al tener muchas unidades experimentales; esto se minimiza usando factoriales fraccionados donde se prueba una sola parte de todo el conjunto de tratamientos.

**Registro de Datos,** Los datos de los diseños factoriales se registran como se muestra en el Cuadro 3.

**Cuadro 3. Cuadro de registro de datos de los diseños factoriales**

FACTOR A	FACTOR B			
	$B_1$	$B_2$	...	$B_b$
$A_1$	$y_{111}, y_{11r}, \dots, y_{11r}$	$y_{121}, y_{12r}, \dots, y_{12r}$		$y_{1b1}, y_{1br}, \dots, y_{1br}$
$A_2$	$y_{211}, y_{21r}, \dots, y_{21r}$	$y_{221}, y_{22r}, \dots, y_{22r}$		$y_{2b1}, y_{2br}, \dots, y_{2br}$
$A_a$	$y_{a11}, y_{a1r}, \dots, y_{a1r}$	$y_{a21}, y_{a2r}, \dots, y_{a2r}$		$y_{ab1}, y_{abr}, \dots, y_{abr}$

## Modelo Estadístico

$$y_{ijk} = \mu + A_i + B_j + (AB)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \begin{cases} i = 1, \dots, a \\ j = 1, \dots, b \\ k = 1, \dots, r \end{cases}$$

Donde  $\mu$  es la constante que representa el promedio global,  $A_i$  es el efecto verdadero del i-esimo nivel del factor A,  $B_j$  es el efecto verdadero del j-esimo nivel del factor B,  $(AB)_{ij}$  es el efecto verdadero del i-esimo nivel del factor A con el j-esimo nivel del factor B, y  $\varepsilon_{ijk}$  es el error experimental asociado con la k-esima unidad experimental sujeta a la ij-esima combinación del tratamiento.

Se supone que  $\mu$  es una constante y que las variables aleatorias  $\varepsilon_{ijk}$  están distribuidas normal, independiente, con media cero y varianza constante  $\sigma^2$ .

En este sentido, es mejor intervenir el proceso mediante un plan experimental que monitorear simplemente el proceso hasta obtener señales útiles que permitan mejorarlo. No obstante, para un óptimo desarrollo del experimento es preciso tener en cuenta que,

- Se debe poder comprobar las hipótesis objeto de estudio, evitando confusiones derivadas de las variables insospechadas (ruido), como son, errores de medida desproporcionados, etc.
- Se debe poder revelar la existencia de cualquier causa importante de variación, aunque no haya sido adelantada como hipótesis.
- Se debe mantener los costes de experimentación a un nivel razonable, en comparación con el problema objeto de estudio.
- Se debe tener un alto grado de seguridad en las respuestas.
- Si el Experimento se realiza en un laboratorio, éste ha de ser, respecto a las variables estudiadas, un buen indicador de las pruebas que se obtendrían en el taller o "in situ".
- Si el Experimento se realiza durante el desarrollo normal del proceso en estudio, se tendrá además cuidado de interferir lo menos posible en el trabajo



normal y protegerse de las interferencias no autorizadas o involuntarias en la prueba por parte del personal.

## 6. METODOLOGÍA

Para el cumplimiento del objetivo general planteado, se desarrollarán tres (3) etapas bajo técnicas de investigación de tipo descriptiva y analítica, donde se dé a conocer la situación de la calidad de bagazo que se obtiene en la planta de desmedulado de la empresa productora de papel ubicada en las instalaciones del central azucarero, con la caracterización de la materia prima principal del proceso de fabricación de papel, la descripción de los factores, actividades, procesos, procedimientos y demás inherentes a este proceso productivo; y por último la elaboración e implementación de un diseño estadístico de experimentos.

### 6.1. ETAPA 1: DOCUMENTACIÓN Y TRAZABILIDAD DEL BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR

Se iniciará una etapa de investigación, documentación y análisis de laboratorio al bagazo de caña de azúcar que llega a la planta de la empresa papelera para iniciar el proceso de fabricación de pulpa y papel.

**RESULTADOS ESPERADOS:** conocer las propiedades y composición del bagazo, así como el comportamiento que ha tenido a través de los años en la planta papelera.

### 6.2. ETAPA 2: CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO DE DESMEDULADO

Se hará uso de metodologías de recolección, análisis y presentación de datos, tales como diagramas de bloques y de flujo del sistema de la empresa papelera, estudio de las 5 M's, y la descripción de los elementos relacionados con el proceso; todos los anteriores focalizados en la planta de Desmedulado con el fin de caracterizar el proceso de desmedulado, entender el funcionamiento del mismo, como también el flujo de material e información en la empresa productora de papel.

**RESULTADOS ESPERADOS:** Entender y conocer el funcionamiento, partes, procesos y procedimientos que se llevan a cabo en la planta de desmedulado para estudiar y analizar la sinergia existente en el sistema y posteriormente proponer mejoras sobre el mismo.

### **6.3. ETAPA 3: EXPERIMENTACIÓN**

Se realizarán pruebas en las cuales se introducirán cambios deliberados en las variables de entrada que forman el proceso (configuración de cuchillas, tipo de Criba y carga de alimentación de bagazo entero al desmedulador), de manera que sea posible observar e identificar las causas de la variabilidad en las variables de salida del sistema (contenido de fibra en el bagazo desmedulado y en el polvillo, como también el rendimiento en remoción de cenizas en la planta de desmedulado).

**RESULTADOS ESPERADOS:** A partir de la elaboración del diseño completamente al azar y de diseños factoriales de tipo  $2^k$ , encontrar una configuración óptima de los factores del sistema que mejore la calidad del bagazo desmedulado.

## 7. DESARROLLO

Para el cumplimiento del objetivo general planteado, se ejecutarán tres (3) etapas donde cada una da respuesta a los objetivos específicos.

### 7.1. ETAPA 1: DOCUMENTACIÓN Y TRAZABILIDAD DEL BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR

El bagazo de caña de azúcar es el residuo de los procesos de molienda de los centrales azucareros, es de tamaño uniforme con una longitud promedio comprendida entre 5 y 7.5 cm, con un ancho máximo de 2 cm y con densidad que varía entre 120 y 160 Kg/m<sup>3</sup>.

Está compuesto por sólidos, solubles, agua, cenizas y elementos que se consideran materia extraña, clasificados en materia extraña vegetal y materia extraña mineral. La primera hace referencia a los residuos de la cosecha (hojas secas, cogollos, chulquines, lalas y cepas). La segunda se constituye por magnesio, calcio, sodio, potasio, hierro, óxidos de azufre, entre otros<sup>7</sup>.

El agua permanece de dos formas generales: agua libre o absorbida y agua ligada. La primera (predominante) se libera con gran facilidad y se estima en la mayor parte de los métodos para el cálculo de contenido de agua; La segunda se halla combinada o absorbida y normalmente se encuentran ligadas a las proteínas. Para su eliminación se deben someter a un calentamiento de distinta intensidad. Por tanto que, hablar de humedad entonces, es hablar de la pérdida en peso por evaporación que sufre un determinado producto al someterlo a condiciones de calentamiento y está expresada en porcentaje<sup>8</sup>.

La cantidad de humedad existente en el bagazo de caña de azúcar es de gran importancia puesto que afecta de manera decisiva su energía disponible.

El calor específico de combustión es la propiedad más importante de los combustibles y para el caso del bagazo, depende principalmente de la

---

<sup>7</sup> CARVAJAL, Arbey; GOMEZ, Adolfo y BRICEÑO, Carlos. Efecto de las cenizas en el poder calorífico superior del bagazo de la caña de azúcar. En: Carta trimestral cenicaña. No. 4. Cali, Colombia. 2004.

<sup>8</sup> KIRK, Ronald; SAWYER, Ronald y EGAN, Harold. Composición y análisis químico de los alimentos de Pearson. Ed. 2. México D.F: Compañía Editorial Continental, 1996.

humedad, el contenido de azúcar, el contenido de cenizas y la variedad de caña.

**7.1.1. Composición del bagazo de la caña de azúcar.** Químicamente el bagazo de la caña de azúcar se compone de Carbono, Oxígeno, Hidrógeno, Cenizas y Agua, con proporciones de 23%, 22%, 3%, 2% y 50%, respectivamente.

Su composición media es 50% de humedad, 46% de fibra, 2% de sólidos solubles en agua y 2% de impurezas minerales.

La fibra del bagazo de la caña de azúcar está compuesta por celulosa (48%), Hemicelulosa (40%) y lignina (12%).

En el proceso de producción de papel todo componente diferente a la fibra se considera impureza, puesto que la separación de estos requiere de procesos que aumentan los costos de producción de pulpa y papel.

Con el propósito de identificar las cantidades de impurezas contenidas en el bagazo desmedulado, a nivel de laboratorio se llevan a cabo dos procesos de análisis:

- **Análisis de humedad:** Es un proceso con el cual se obtiene el contenido de humedad que trae consigo con el bagazo desmedulado. Este contenido está compuesto sólidos, minerales e impurezas solubles, y agua.
- **Análisis de cenizas:** Este análisis da respuesta al contenido de sólidos insolubles del bagazo de caña de azúcar antes y después del proceso de desmedulado.

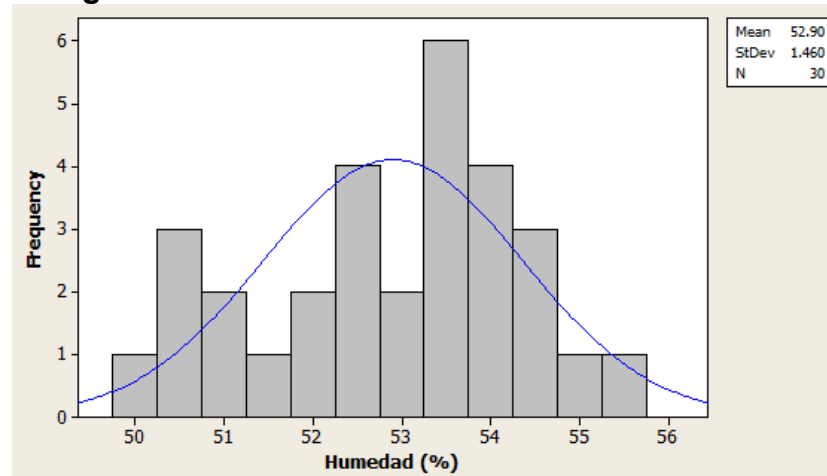
Se tomaron 30 muestras de bagazo entero en la planta de desmedulado y se realizaron los respectivos análisis en el laboratorio de fibra en las instalaciones de la empresa papelera. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 2.

**Tabla 1. Resultados de análisis de laboratorio**

Análisis de Laboratorio		
n	Humedad (%)	Cenizas (%)
1	51,76	5,14
2	51,01	5,6
3	50,58	6,52
4	51,1	11,41
5	54,17	4,72
6	53,13	4,42
7	53,3	3,51
8	53,15	7,99
9	54,38	7,14
10	53,87	5,8
11	50,63	6,13
12	52,6	8,22
13	52,62	7,26
14	52,1	8,65
15	52,65	5,6
16	51,58	4,45
17	53,36	5,18
18	53,4	7,53
19	53,83	8,78
20	54,95	6,43
21	55,68	7,67
22	54,23	7,6
23	54,5	6,09
24	53,72	6,95
25	53,57	5,68
26	53,26	4,3
27	52,57	4,32
28	49,99	4,72
29	50,65	11,41
30	54,65	6,13

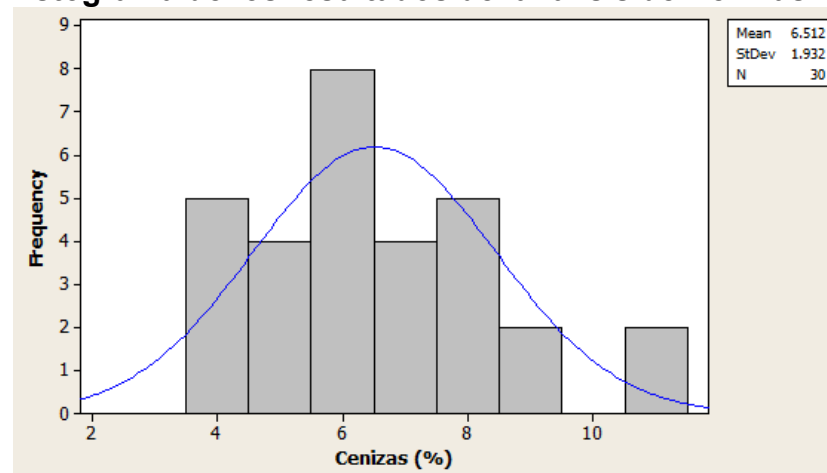
De la anterior Tabla 1, se obtiene:

**Figura 8. Histograma de los resultados del análisis de Humedad**



En el Figura 8, se puede observar que los datos obtenidos se comportan normal, con una media de 52,90 % de humedad y una desviación estándar de 1,460. En conclusión, se puede decir que el bagazo entero proveniente del central azucarero no presenta variaciones significativas a la entrada del proceso de desmedulado (en condiciones de verano) y su media es aproximada al % de humedad teórico (50%).

**Figura 9. Histograma de los resultados del análisis de Cenizas**

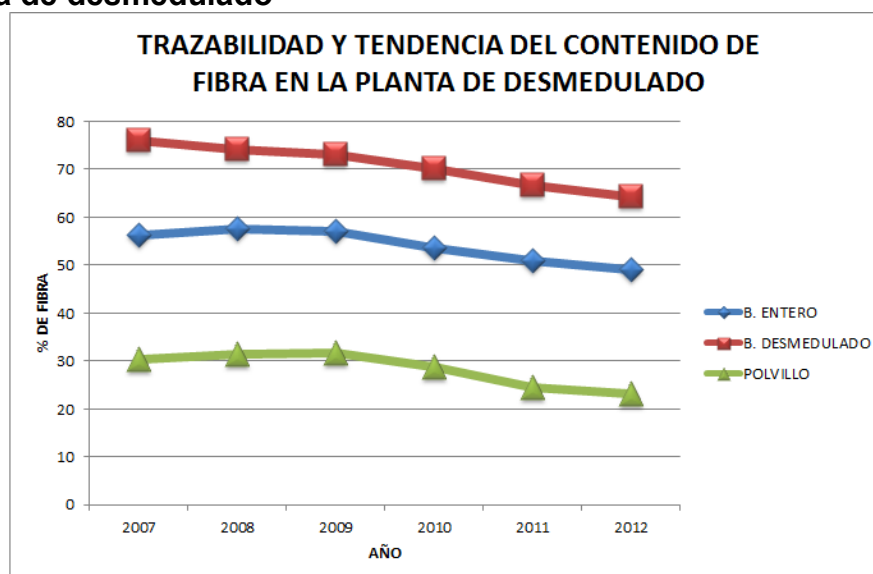


En el Figura 9, se puede observar que el contenido de cenizas en el bagazo entero cumple con el supuesto de normalidad, con una media de 6,512 % de cenizas y una desviación estándar de 1,932. Dicho esto, es correcto afirmar que el bagazo de caña que suministrado por el central azucarero tiene un comportamiento del contenido de cenizas (en condiciones de verano) similar al valor teórico 5% (3% cenizas y 2% de impurezas minerales insolubles).

En conclusión, las condiciones del bagazo entero entregado por parte del central azucarero en condiciones de verano no presentan variaciones significativas de contenido de impurezas (Agua, sustancias solubles, sílice e impurezas insolubles) y las proporciones se encuentran alrededor de los valores químicamente teóricos de la composición del bagazo de caña de azúcar.

**7.1.2. Trazabilidad del bagazo de caña de azúcar en la planta de desmedulado.** Los registros del contenido de fibra del bagazo de caña de azúcar suministrado por el central azucarero (bagazo entero), el bagazo desmedulado y el polvillo en la planta de desmedulado desde enero de 2007 a diciembre de 2012 se muestran en el siguiente gráfico (valores promedio año):

**Figura 10. Gráfico del comportamiento histórico del contenido de fibra en la planta de desmedulado**



De la Figura 10, se puede observar que en los años 2007, 2008 y 2009, en la planta se obtuvieron producciones de bagazo desmedulado con un contenido óptimo de fibra apta para la fabricación de pulpa y papel. No obstante, el 14 de Agosto de 2010 el central azucarero implementó máquinas desfibriladoras en su proceso de producción con el fin de aumentar la extracción del jugo de la caña de azúcar, realizando un mayor corte de la caña. Lo que ocasionó una reducción significativa del tamaño final de la fibra del bagazo resultante viéndose afectada la eficiencia de la planta.



## 7.2. ETAPA 2: CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO DE DESMEDULADO

El proceso de desmedulado es un proceso mecánico por el cual se limpia el bagazo y se extrae la fibra apta para el proceso de producción de pulpa y papel. En la actualidad, existen tres tipos de procesos como son:

**Desmedulado en seco:** Se ejecuta con 15 a 20 % de humedad del bagazo, y posee la desventaja de poca eficiencia de separación de las médulas entre 30 y 50 % de la cantidad original.

**Desmedulado en húmedo:** Por este método se desmedula tal como sale de la industria productora, es decir con una humedad del 50 %. Ventajas: Mayor eficiencia en la separación de las médulas, eficiencia mínima de separación es del 60 % de la medula original.

**Desmedulado en mojado o en suspensión:** Mediante este método la médula, polvo y materias extrañas son exhaustivamente separados de la fibra. El bagazo ingresa al proceso de desmedulado con una consistencia de 10 a 18 % (80 a 90 % de humedad). En general éste es usado como segunda etapa de desmedulado y se lo ubica en la planta de preparación de la pasta (planta celulósica).

El tipo de proceso de desmedulado que se realiza en la planta de desmedulado es el Desmedulado en húmedo.

Una vez llega el bagazo desmedulado a la empresa productora de papel se le realizan tres procesos de limpieza (Fase de desmedulado que corresponde a desmedulado en húmedo, desmedulado en mojado y lavado). Posteriormente para la producción de pulpa se realizan los siguientes procesos:

**Pulpado químico:** El pulpado químico del bagazo se realiza industrialmente mediante procesos alcalinos, de modo particular por el proceso a la soda. Los procesos continuos muy difundidos, algunos de los digestores más conocidos lo constituyen el digestor M&D, y el digestor PANDIA dentro de las alternativas de pulpados químicos están proceso Kraft; proceso a la soda caliente; proceso al sulfito neutro, proceso a la soda antraquinona, entre otros.

**Lavado y depuración:** En el lavado, la pulpa saliente de la etapa de digestión se pone en contacto íntimo con el agua, ejecutado normalmente en tres etapas de lavado, a fin de extraer la mayor cantidad de reactivos químicos usados. La solución acuosa obtenida que arrastra los químicos usados provenientes de la

digestión, recibe el nombre de licor negro débil, éste es enviado al sistema de recuperación de reactivos químicos.

Las pulpas lavadas son luego sometidas al proceso de depuración, en ésta se separan los materiales extraños como arenas, piedras, material incocido, material extraño, etc. Una vez que las pulpas están depuradas son enviadas al proceso de blanqueo.

**Pulpado de alto rendimiento:** La separación de las fibras consiste en una combinación de acciones mecánicas y químicas, con extracción parcial de la lignina, obteniéndose rendimientos entre 95 % y 70 %. Los pulpados químico-mecánicos, como el proceso a la soda fría, consisten en la acción de un agente químico como el hidróxido de sodio seguido de la refinación multi-etapas se produce un hinchamiento de la pared celular, ablandando el material y posibilitando en la etapa de refinación la ruptura entre la pared primaria y la pared secundaria, lo que favorece el enlace.

**Blanqueo:** El blanqueo de pastas químicas de bagazo es una operación sencilla donde interviene una etapa de uso de ozono como agente blanqueante alcanzándose niveles de blanco cercano al 90 % ISO, partiendo de una kappa de 13,5 % ISO.

La pulpa es depositada en tanques de almacenamiento antes pasar a los procesos de refinación, Mezclado, Dilución y depuración, formación, prensado y secado para la producción de papel, así:

**Refinación:** Las fibras son sometidas a una acción mecánica para desarrollar sus propiedades papeleras óptimas con relación al producto a fabricarse.

**Mezclado:** Etapa en la que se realiza la formación del empaste por la adición en la proporción adecuada de las pulpas química blanqueada de bagazo, pulpa química blanqueada de coníferas o pulpa de papel reciclado con el fin de darle mayor resistencia mecánica, así como el agregado de carbonato de calcio como carga mineral, encolantes y aditivos de acuerdo a la formación específica para el papel a producir.

**Dilución y depuración:** La mezcla de pulpas y aditivos formada en la etapa anterior se pasa por una serie de depuradores (ciclónicos y tamices presurizados) con el objeto de retirar las impurezas para mejorar la calidad del empaste garantizando de esta forma la calidad del papel producido.

**Formación de la hoja:** Esta mezcla o suspensión de pulpas, aditivos químicos y agua ingresa a la mesa de formación de papel, más conocida como máquina de papel a través de la caja de cabeza, que se encarga de distribuir la suspensión sobre la tela en forma uniforme a través de todo el ancho de la máquina, en la mesa de fabricación. Esta tela avanza a alta velocidad y a medida que esto sucede, mediante una combinación de efectos de gravedad y vacío, se va extrayendo el agua de la suspensión quedando al final de la misma, una estructura húmeda de fibras entrelazadas que es en sí, conformando la hoja de papel.

**Prensado:** La hoja formada posee una gran cantidad de agua, que necesita ser extraída a fin de consolidar el proceso de formación, esta extracción se ejecuta primeramente por medios mecánicos. La hoja es apoyada sobre fieltros, obligándola a pasar a través de una serie de pares de rodillos, extrayendo gran parte del agua. La humedad final del papel al final del proceso está entre los 45 a 50 % base húmeda.

**Secado:** En vista a la limitación del proceso de prensado, el excedente del agua debe extraerse indefectiblemente por evaporación. En tal sentido el papel que egresa de la sección de prensas es conducido a través de una serie de cilindros secadores de gran porte calefaccionados por vapor en su interior, que se encuentran ubicados en forma alternada, de manera que una cara del papel entre en contacto con la superficie lateral de uno de los cilindros y luego la otra cara del papel entre en contacto con el cilindro siguiente. De esta manera, el mismo va absorbiendo energía de los cilindros eliminando su contenido de humedad por evaporación hasta alcanzar valores de humedad inferiores al 10 % (normalmente se ajusta a 5 % en base húmeda). Esta hoja continua de papel es enrollada en rollos de gran porte, llamados popes, los que posteriormente se procesan en una bobinadora que corta a bobinas de anchos y diámetros menores de acuerdo con lo solicitado por los clientes o por el programa de conversión a productos finales como resmas u hojas.

**Conversión del papel:** En esta sección se convierte, al papel producido en bobinas embaladas, hojas, formularios continuos y resmas, mediante líneas modernas.

**Efluentes líquidos:** La tecnología seleccionada demanda los siguientes volúmenes de agua para el proceso, 30 m<sup>3</sup> de agua por cada tonelada de papel de impresión y escritura a producir, de los cuales 6,8 m<sup>3</sup> por tonelada de papel corresponde a la planta de papel y 23,2 m<sup>3</sup> por tn de papel a la planta celulósica.

El volumen total de efluentes líquidos que se genera es de 23,20 m<sup>3</sup> por tonelada de papel producido, de estos 17,86 m<sup>3</sup> provienen de la planta celulósica y 5,34 m<sup>3</sup> de la planta de papel.

Para el tratamiento de los efluentes líquidos se pueden citar: los sistemas de lagunas de estabilización anaeróbicas, facultativas o sistemas facultativos, sistemas aireados de lodos activados, lagunas aireadas, sistemas anaeróbicos de reactores de flujos ascendentes o de flujos descendentes, lagunas cubiertas, etc.)

**Efluentes gaseosos:** El punto de generación en las calderas lo constituye la emisión de los gases de combustión, en tal sentido se prevé dos aspectos fundamentales.

- Control de calidad de combustión, a través de analizadores de gases y manejo operativo del proceso.
- Retención de material particulado, sistemas de retención consistentes en precipitadores electrostáticos para la caldera de recuperación y horno de cal con lavadores de gases y sistemas secos de trampas para la caldera de la planta de papel, otros.

En la generación puntual o difusa de gases dentro de la línea de producción, se prevé mitigar las emisiones a través del encapsulamiento y aspiración combinados con las trampas ciclones, filtro de mangas y lavadores de gases dependiendo de la naturaleza del proceso generador.

**Efluentes sólidos:** La generación de residuos sólidos proviene del desmedulado en suspensión.

Luego de eliminar el excedente, son quemados en la caldera de la planta de papel, a la totalidad de sólidos generados que no pueden usarse como combustibles (arena, piedras o bien aquellos que constituyen los residuos de estos, como cenizas de la caldera de la planta de papel), los sólidos del tratamiento primario, y los lodos biológicos del tratamiento secundario, son dispuestos en un relleno sanitario<sup>9</sup>.

---

<sup>9</sup> BRITOS, Leandro José y RAMIREZ, Gustavo Enrique. Proyecto de una planta de desmedulado a partir del bagazo de caña. Trabajo de grado Ingeniero Electromecánico. Asunción. Universidad Nacional de Asunción. Facultad de Ingeniería, 2012. 15p

**7.2.1. análisis de las 5 m's en la planta de desmedulado.** El método de las "5 M" es un sistema de análisis estructurado que se fija cinco pilares fundamentales alrededor de los cuales se describe un sistema y/o giran las posibles causas de un problema. Estas cinco "M" son las siguientes:

**Máquina:** Un análisis de las entradas y salidas de cada máquina que interviene en el proceso, así como de su funcionamiento de principio a fin y los parámetros de configuración.

**Método:** Se trata de cuestionarse la forma de hacer las cosas. Cuando se diseña un proceso, existen una serie de circunstancias y condicionantes (conocimiento, tecnología, materiales,...) que pueden variar a lo largo del tiempo y no ser válidos a partir de un momento dado.

**Mano de obra:** El personal puede ser el origen de un fallo. Existe el fallo humano, que todos conocemos y si no se informa y forma a la gente en el momento adecuado, pueden surgir los problemas. Cambios de turno en los que el personal saliente no informa al entrante de incidencias relevantes, es un ejemplo.

**Medio ambiente:** Las condiciones ambientales pueden afectar al resultado obtenido y provocar problemas. Valorar las condiciones en las que se ha producido un fallo, nunca está de más.

**Materia prima:** hace referencia a los materiales empleados, contar con un buen sistema de trazabilidad a lo largo de toda la cadena de suministro y durante el proceso de almacenaje permitirá tirar del hilo e identificar materias primas que pudieran no cumplir ciertas especificaciones o ser defectuosas.

En la descripción del presente proceso se analiza a continuación:

**7.2.1.1. MAQUINAS.** Los equipos de las sub-fases de la planta de desmedulado se registran las siguientes tablas con su codificación.

**Cuadro 4. Equipos de la sub-fase de compactación y cargue**

<b>EQUIPOS SUBFASE "COMPACTACION Y CARGUE"</b>	<b>CODIGO</b>
Transportador de Paletas	114N4M1
Compactadora	114H5M1
Intercambiador	1101HE02
Bomba de Alta	1101HJ02A
Bomba de Baja	1101HJ02B
Compuerta	1101HN04T51
Torre de enfriamiento	1101HE01
Bomba Torre de enfriamiento	114E1M1
Transportador de Banda	11N5M1
Ducto de Compactadora a Compuerta de Cargue	1101H02T08
Pistón U.H Compactadora	114H5M2
Compuerta de Cargue	1101HN02T02

**Cuadro 5. Equipos de la sub-fase de desmedulado**

<b>EQUIPOS SUBFASE "DESMEDULADO"</b>	<b>CODIGO</b>
Compuerta de Alimentación	114N1M2
Transportador de Banda	114N1M1
Separador Magnético	114N1V1
Transportador de paletas	114N2M1
Tornillo Dosificador 1 #	114HN1M1
Tornillo Dosificador 2 #	114HN2M1
Tornillo Dosificador 3 #	114HN3M1
Tornillo Dosificador 4 #	114HN4M1
Desmedulador # 1	114H1M1
Desmedulador # 2	114H1M2
Desmedulador # 3	114H1M3
Desmedulador # 4	114H1M4
Transportador de Banda	114N3M1
Weightómetro	1101WT001
Ventilador	114J1M1
Ciclón	1101HS01
Compresor	114Y1M1.
Rotor válvula	114HN5M1.
Puente Grúa	114P1M1.
Transportador de banda	114N6M1.
Transportador de banda	114N7M1.
Transportador de paletas	114N8M1
Tornillo dosificador	114HN6M1.
Tornillo dosificador	114HN7M1
Tornillo dosificador	114HN8M1.
Tornillo dosificador	114HN9M1.
Transportador de polvillo	114N9M1
Transportador de polvillo	114N10M1
Transportador de polvillo	114N11M1.
Tornillo dosificador	114HN10M1.
Tornillo dosificador	114HN11M1.
Tornillo dosificador	114HN12M1.
Tornillo dosificador	114HN13M1.
Transportador de polvillo	114N12M1

**7.2.1.2. Material.** El material al cual se le realiza la transformación en el proceso de Desmedulado es un subproducto que se obtiene de la caña de azúcar una vez se realiza la extracción del jugo de la misma para fabricación de azúcares y alcoholes, llamado Bagazo.

El proveedor de la empresa productora de papel es el ingenio Azucarero, donde una vez el bagazo crudo termina el proceso de desfibrilación, este se encarga de enviarlo a la planta de desmedulado a volumen inconstante, siendo este último un factor crítico para el proceso.

### **7.2.1.3. Métodos**

☑ **PROCEDIMIENTO.** La fase de operación se puede dividir en dos (2) sub-fases funcionales (ver Figura No. 14):

- ✓ Desmedulado.
- ✓ Compactación y cargue.

En la sub-fase de “Desmedulado”, el bagazo entero proveniente de los molinos del central azucarero es dosificado por una compuerta motorizada y recibido por dos transportadores de banda, ubicados de tal forma que uno recibe el bagazo del otro; antes de caer al transportador de paletas se cuenta con un separador magnético (para evitar que objetos metálicos entren al proceso de desmedulado).

La alimentación de bagazo a los equipos desmeduladores se realiza por medio de cuatro tornillos dosificadores.

La fibra desmedulada sale por la parte central del desmedulador, el polvillo por alrededor y cae en el transportador 114N6M1. Transportador de polvillo # 6 (ver Figura No. 15).

La velocidad de rotación de las cuchillas, genera un movimiento de aire durante la extracción del polvillo, Este aire, así como las partículas de finos de polvillo que tienen una granulometría de 0 a 4 mm y una humedad del 50%, están canalizados a un conducto por medio de tres campanas que están ubicadas sobre y a lo largo del transportador 114N6M1. Para esto se cuenta con un sistema de limpieza o circuito de aspiración que atrapa las partículas de polvillo volátiles existentes en el transportador de polvillo y que pueden ir a la atmósfera, este sistema consta de un ventilador, tres campanas, un ciclón y



una serie de tuberías. Se estima que el sistema de aspiración puede atrapar una cantidad estimada de polvillo arrastrado con el aire de 150 a 200 Kg/h.

En la sub-fase de “Compactación y Cargue”, el bagazo desmedulado es conducido por el transportador de banda 114N3M1 Transportador de bagazo # 3 (ver Figura No. 14) y depositado al transportador de tablas hacia la Compactadora para formar pacas que son guiadas por un ducto a la zona de cargue donde se encuentran los camiones que conducen el bagazo desmedulado a la planta principal.

El agua industrial es utilizada como refrigerante para controlar la temperatura del aceite hidráulico.

Existen unas condiciones establecidas con el central azucarero, acerca de la cantidad de polvillo que permite retornar a la caldera del mismo por parte de la fase de desmedulado. Esta está establecida que no debe sobrepasar el 40% de la cantidad de bagazo entero que se recibe de parte del ingenio.

Para controlar este 40%, el operador lleva una hoja de reporte donde se anota la hora inicial y final del cargue de un camión, la medición inicial y final del weightómetro de polvillo durante el cargue.

## ☒ **FUNCIONAMIENTO, CONTROL Y MEDICIÓN**

➤ **Sub-fase De Desmedulado.** La compuerta de Alimentación 114N1M2 es movida por un motor eléctrico de velocidad fija, accionada desde el pupitre de control en forma manual, con señal luminosa que indica la posición (Abierta – Cerrada). También cuenta con un volante sujeto a una cadena para abrirla o cerrarla desde el campo si es necesario.

El transportador de banda 114N1M1 (encima de este transportador se encuentra un Electroimán) recibe el bagazo y se encargan de llevarlo hacia un transportador de paletas; los transportadores de banda están conformados por una banda de caucho que esta Soportada por unos rodillos inclinados en la parte de carga y por rodillos horizontales en la parte de retorno, poseen un rodillo conducido y un rodillo que es movido por un motor reductor de velocidad fija, el movimiento entre el motor y el reductor es realizado por un sistema de correas que cuentan con un sistema de paro de emergencia, accionado por una guaya que se encuentra a lo largo del transportador y con un sensor de rotación ubicado en el rodillo de cola.

El separador magnético (electroimán) 114N1V1 se encarga de retirar materiales metálicos existentes en el bagazo, está conformado por una placa de 120 cm de largo por 140 cm de ancho, con una potencia absorbida de 10200 watts a una tensión de 220 V DC.

El transportador de paletas 114N2M1 cumple una doble función durante su recorrido total, así mientras en la parte superior de su recorrido recibe el bagazo entero del transportador 114N2M1, en la parte inferior lo distribuye en los cuatro tornillos dosificadores. Está conformado por un sproker de cola y un sproker motriz que es movido por un motor reductor de velocidad fija, un conjunto de tablas que se encargan de mover el bagazo a lo largo del transportador y una cadena de arrastre de las tablas. La transmisión del movimiento entre el reductor y el sproker motriz es realizada por una cadena doble, mientras que entre el motor y el reductor es realizado por bandas (al igual que el transportador 114N1M1 cuenta también con sensor de rotación).

El transportador de banda 114N6M1 recibe el polvillo que sale de los desmeduladores. Está conformado por una banda de caucho que esta soportada por unos rodillos inclinados en la parte de carga y por rodillos horizontales en la parte de retorno.

Los tornillos dosificadores 114HN1M1, 114HN2M1, 114HN3M1 Y 114HN4M1 son quienes reciben el bagazo entero depositado por el transportador de paletas y lo alimentan a los desmeduladores. Están conformados por un tornillo sin fin que es movido por un motor eléctrico de velocidad fija, tiene una cadena doble para el sistema de transmisión y un acople directo entre el motor y el reductor.

Los equipos desmeduladores (ver Figura No. 18) se encargan de separar el polvillo del bagazo por la acción de las Cuchillas, constan de una carcasa cilíndrica con dos secciones de diámetro 94,8 cm y 158,4 cm, con un espesor de 0,8 cm y una altura total de 187 cm, un rotor con un eje que por un extremo lleva la polea receptora de 31,5 cm de diámetro y por el otro recibe los discos portadores de las cuchillas. Son siete discos, entre los cuales se colocan un total de veinticuatro ejes, una canastilla cilíndrica de lámina en acero al carbono con perforaciones de 5/16" o 3/8" dividida en dos partes la cual recibe el nombre de criba; un motor eléctrico de velocidad fija de 1340 R.P.M y un sistema de inversión de rotación para que el desgaste de las cuchillas se haga por ambos lados.

Cada equipo desmedulador está diseñado para procesar una tasa de 16.7 metro/hora de bagazo con 50% de humedad. En condiciones normales esto

dará un resultado de 40% de separación de medula y producirá 10 metro/hora de fibra desmedulada con un contenido de humedad de 50%.

El circuito de aspiración consta de las siguientes partes:

- ✓ El ventilador centrífugo de rotor abierto (114J1M1), para evitar que el polvillo se atasque. tiene un diámetro de 96 cm, la velocidad de rotación es de 1125 R.P.M para un caudal de 4.7 M<sup>3</sup>/S y transmisión por correas trapezoidales.
- ✓ El ciclón (1101HS01), construido en lámina de acero tiene una altura de 644 cm, un tubo cilíndrico de 450 cm de largo y un diámetro de 7.5 cm con una curva de salida para las salida de aire orientable, visera en forma de paraguas y postigo de entrada en espiral.
- ✓ El colector principal tiene un diámetro de 65 cm, se encuentra montado a la armadura del equipo y está compuesto de palastros de 1 y 0.15 cm en las partes rectas y 0.15, 0.20 cm en las partes curvas.
- ✓ Un Transportador mecánico con tres capachos (Campanas) de diámetro 80 a 40 cm cada capacho contiene un tubo (chute) y una válvula de 45 cm de diámetro accionada por cadena.
- ✓ Una Vaina de retroceso de 65 cm de diámetro, con una longitud de 900 cm conduce el aire y los residuos desde la salida del ventilador hasta el ciclón.

➤ **Sub-fase De Compactación Y Cargue.** La compactadora de bagazo 114H5M1, es la encargada de compactar el bagazo desmedulado proveniente de los desmeduladores. La fibra es elevada a la compactadora por intermedio de los transportadores de banda y paletas # 114N3M1 y # 114N4M1, respectivamente. La fibra compactada es elevada a los camiones por medio del ducto de salida de bagazo de la compactadora 1101H02T08.

La capacidad de compactado es de 44 ton/h, tiene un pistón hidráulico accionado por dos bombas y un motor, el ciclo de funcionamiento es controlado por un sistema de alarma ultrasónica (en operación normal realiza aproximadamente siete ciclos por minuto).

La automatización de la compactadora se consigue por medio de un equipo hidráulico con un control eléctrico. El control de las partes móviles se realiza

por medio de velocidad Vs presión para ejecutar la utilidad máxima del poder disponible y para controlar la máquina y poder producir de una forma automática y consistente pacas de buena calidad.

**CONTROL ELECTRICO.** Los puntos de control eléctrico en general consisten en:

- La foto celda (control sónico), la cual acciona la máquina para la fuerza de golpe del cilindro hidráulico cuando la tolva (chute de llenado) se ha llenado al nivel adecuado.
- El switch limite, el cual es accionado al final de la fuerza de golpe del cilindro hidráulico causando que este se retraiga alistándose para el próximo golpe.
- El switch limite, que alista la compactadora para el próximo golpe de fuerza del cilindro hidráulico cuando la foto celda esta lista para trabajar.

**CONTROL DEL PANEL.** Se encuentran botones para iniciar (start) y parar (stop) en el panel, cuando el selector está en manual el cilindro hidráulico se puede avanzar o retraer de cualquier posición voluntariamente, y cuando el selector está en automático la señal de movimiento del cilindro hidráulico es establecida por la foto celda y el switch limite.

**CONTROL HIDRÁULICO.** Esta consiste en una unidad hidráulica que dirige el flujo de aceite de las bombas hasta el cilindro hidráulico. La presión ejercida en la fuerza de golpe del cilindro hidráulico crece desde cero hasta el máximo ajustado en la válvula reguladora de presión (de 1500 psi a 2400 psi) teniendo en cuenta el máximo consumo de amperaje en el motor eléctrico.

Para ejecutar el avance del pistón el aceite hidráulico cae por gravedad, del tanque de almacenamiento a la bomba # 2 de baja presión alto caudal, la cual tiene una capacidad de bombeo de 109 Gal/min, una vez bombeado este pasa por el banco de válvulas; de aquí se envía al pistón hidráulico donde se encarga de llenar la cámara del pistón para el avance de este y dar el impulso inicial al gato hasta un alcance de 600 psi, dando con esto el inicio del compactado de la carga. Seguidamente entra en funcionamiento la bomba # 1 de bajo caudal alta presión que tiene una capacidad de 85 Gal/min y se encarga de realizar el empuje de toda la carga acumulada a lo largo del ducto de cargue; mientras el pistón realiza su recorrido, el aceite almacenado en la

cámara de retroceso es evacuado por la línea de retroceso del gato hacia el banco de válvulas y de aquí al tanque de aceite hidráulico.

Una vez el pistón llega al final de su recorrido de avance se da una señal que llega a la bomba # 1 de baja presión alto caudal, la cual envía aceite al banco de válvulas y de allí a la cámara del pistón para regresar el pistón a su posición original (igualmente el aceite que se encontraba en la cámara de avance es retornado por la línea de avance del gato al tanque de aceite).

La compactadora cuenta con unos equipos adicionales, fundamentales para la operación de la misma, entre ellos están:

- ✓ El intercambiador de calor.
- ✓ Sistema de ajuste mecánico para la tensión de la paca.
- ✓ Banco de válvulas, que consta de las siguientes válvulas:
  - Válvula regulación presión bomba de alta o válvula de descarga de alto volumen.
  - Válvula de control amperaje motor.
  - Avance o empuje del pistón.
  - Retroceso del pistón.
  - Solenoide.
  - Manómetro (de 0 a 3000 PSI).
  - Válvula de alivio de alivio (H).
- ✓ Bomba de bajo caudal alta presión.
- ✓ Bomba de alto caudal baja presión.
- ✓ Un tanque de almacenaje de aceite hidráulico con una capacidad de 1514 litros.
- ✓ Motor de 75 KW – 1800 R.P.M. enfriado por ventilador incorporado.
- ✓ Kit de filtros para aceite y aire.
- ✓ 8 uñas de ajuste para la retención de la columna de bagazo.

La compuerta de cargue de camiones (1101HN02T02) es accionada por una estación hidráulica, consta de un gato de doble acción, adelantamiento positivo en los dos sentido, abierto y cerrado.

El transportador de banda (114N5M1) recibe el bagazo que no alcanza a comprimir la compactadora y lo lleva hasta la compuerta de cargue donde se alimenta a los camiones.

La bomba centrífuga (114E1M1) es accionada por un motor eléctrico de velocidad fija se utiliza para enviar agua de la torre de enfriamiento al intercambiador para la refrigeración del aceite hidráulico de la compactadora.

La torre de enfriamiento (1101HE01) consta de una serie de bandejas fabricadas en aluminio ubicadas una bajo la otra. El agua caliente que proviene del intercambiador es dispersada por medio de siete “flautas” construidas en tubería galvanizada de 1’ y perforadas con un orificio de 3mm a una distancia de 1’ entre huecos, los cuales actúan como ducha. El agua cae sobre la bandeja superior y pasa paulatinamente a las siguientes bandejas, la tercera bandeja posee una malla en la cual se filtra el agua y se retienen los sólidos, el agua continua su recorrido por otra sección de bandejas y antes de ingresar al tanque de almacenamiento se pasa nuevamente por otro filtro. Sobre la parte superior de la torre se encuentra un ventilador extractor que sirve para evacuar los vahos de calor que trae el agua. El agua fría es almacenada en el tanque y es enviada nuevamente al intercambiador.

La compuerta 1101HN04T51 del Transportadora 114N4M1 a la compactadora, es movida por un motor eléctrico de velocidad fija, esta puede ser accionada de forma automática por un sensor ultrasónico cuando el chute se llena y en forma manual desde el panel local, su posición (Abierta – Cerrada) se indica con una señal luminosa. También cuenta con un volante sujeto a una cadena para abrirla o cerrarla desde el campo si es necesario.

En la planta de desmedulado se obtienen un producto (Bagazo desmedulado) y dos subproductos (Polvillo y agua de desechos) a los cuales se les realizan análisis periódicos con el fin de determinar si el funcionamiento de la fase es el correcto. Aparte de equipos especializados de medida de temperaturas, presiones, amperajes y niveles, los cuales dan registros en tiempo real.

**7.2.1.4. MANO DE OBRA.** La planta de Desmedulado trabaja 24 horas (3 turnos de 8 horas) al día; dispone de 3 operadores por turno, los cuales sirven labores de limpieza, control, operaciones como des-atascamiento de línea, cambios de cuchillas y/o cribas, la operación de la compactadora y efectuar rondas periódicas que permitan verificar el buen funcionamiento mecánico de la fase.

- Verificar alineamiento y estado de bandas y tablas en los transportadores.

- Verificar alimentación de agua a la torre de enfriamiento.

- Verificar la ausencia de fugas en bombas y tuberías.

La planta cuenta con una infraestructura que garantiza el bienestar del operador, colocando a su disposición lockers, baños, duchas, oficina de monitoreo y vías de acceso en perfectas condiciones.

El personal de la planta de desmedulado realiza capacitaciones en nuevas tecnologías y en implementación de nuevos productos, procedimientos y/o procesos asumidos por la empresa productora de papel.

**SEGURIDAD INDUSTRIAL Y SALUD OCUPACIONAL.** Según la gerencia de la empresa productora de papel (2004), “La seguridad es una parte integral de todas nuestras tareas diarias y de todo lo que hacemos. No es una actividad separada. La compañía tiene el pleno convencimiento de que todos los accidentes se pueden prevenir y que un ambiente de trabajo con cero (0) accidentes es alcanzable en el corto plazo”<sup>10</sup>.

Esto da a entender que en la empresa productora de papel se le da a la seguridad la importancia que se merece y por lo tanto lemas como:

- ✓ “Seguridad ante todo”

- ✓ “La seguridad depende de usted mismo”

- ✓ “Trabaje con seguridad”

---

<sup>10</sup> CARVAJAL PULPA Y PAPEL. M.F.O. – 11.1-2: MTS ingenios. Archivo de computador. Cali, 2004. Pág. 55.

No son mensajes simplemente, sino que realmente enmarcan la filosofía de la compañía.

Todas las reglas de seguridad de la planta se aplican. Además, hay que enfatizar los siguientes aspectos de seguridad respecto a la planta de desmedulado:

Los implementos de uso diario de seguridad personal son:

- ✓ Casco de seguridad.
- ✓ Botas de caucho o cuero con puntera de acero.
- ✓ Gafas de seguridad.
- ✓ Tapones auditivos.
- ✓ Guantes de cuero.
- ✓ Guantes de caucho.
- ✓ Respiradores desechables.

Como la planta de desmedulado se encuentra tan próxima a las instalaciones del central azucarero y dentro de su área, se deberá tener en cuenta las normas o consignas de seguridad del mismo para evitar conflictos por infracción a dichas normas. Por tanto, se debe tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Revisar que todos los sistemas de transmisión y acoples de los motores tengan su correspondiente guarda de seguridad.
- Asegurar que todos los equipos disponibles para mantenimiento se encuentren aislados de todo tipo de energía (eléctrica, térmica, hidráulica, neumática, etc.) y bloqueadas todas las entradas y salidas.
- Llenar los formatos de los procedimientos de seguridad establecidos para el tipo de trabajo que se va a efectuar, como son:



- ✓ Permisos para espacios confinados.
  - ✓ Permisos para trabajos en calientes.
  - ✓ Permiso para trabajos en alturas.
  - ✓ Zes lockout.
- 
- Mantener la planta limpia y ordenada, ya que esto ayuda a tener un ambiente seguro.
  - Informar cualquier riesgo de accidente que se pueda presentar en la planta.
  - No caminar sobre los transportadores. Aún que estos estén inactivos y/o con Zes lockout.
  - Conocer las rutas de evacuación hacia las zonas de refugio del central azucarero.
  - Usar las gafas de seguridad y los protectores auditivos cuando se trabaje cerca de los equipos desmeduladores.
  - Usar tarjetas de “NO ARRANCAR” cuando se esté trabajando o reparando un equipo.
  - Antes de arrancar los equipos, asegurar que no exista peligro de daños del mismo, ni de accidentes laborales.

Los puntos antes mencionados, de ninguna manera abarcan todos los aspectos que sobre seguridad deben tenerse en cuenta para lograr un ambiente de trabajo con cero accidentes. Solo constituyen una voz de alerta respecto a la importancia que se le debe dar al trabajo seguro.

- **Riesgos existentes en la planta**

**Cuadro 6. Riesgos y mecanismos de protección**

PRODUCTO	RIESGO	MANIPULACIÓN	EFFECTOS PARA LA SALUD	EQUIPOS DE SEGURIDAD ESPECIFICOS	PRIMEROS AUXILIOS
AGUA CALIENTE	Alta Temperatura	Tuberías insuladas y evitar fugas de agua	Quemaduras por temperatura	Equipo de protección adecuado (monogafas, guantes)	Lavar con agua fría y acudir al médico
POLVILLO	Partículas en Suspensión	Buen funcionamiento del ciclón	Partículas en los ojos e inhalación de estas	Equipo de protección adecuado (gafas, mascarar contra polvo)	Acudir al médico
ACEITE HIDRAULICO	Alta Temperatura	Tuberías insuladas y evitar fugas de agua	Quemaduras por temperatura	Equipo de protección adecuado (monogafas, guantes)	Lavar con agua fría y acudir al médico

**Fuente:** MTS Ingenios. Santiago de Cali, 2013. 1 archivo de computador

En el cuadro 6, se analizan los riesgos presentes en la planta de desmedulado, los efectos que pueden generar al personal, los equipos de protección para evitar la incidencia de los riesgos y el plan de primeros auxilios en caso de la ocurrencia de tal riesgo.

**7.2.1.5. MEDIO AMBIENTE.** La empresa productora de papel es una organización multinacional comprometida con la generación de valor, desempeño y liderazgo en siete sectores económicos entre los cuales se encuentra la producción de PULPA Y PAPEL. Sus políticas de generación de valor, ligadas con la protección y sustento del medio ambiente fundamentan la producción de papel a base de bagazo de caña de azúcar o bagazo crudo.

El control de depósitos contaminantes al medio ambiente ha convertido a la empresa productora de papel en la empresa líder en gestión del cuidado medioambiental y ha permitido a la misma ser reconocida internacionalmente por su sello ecológico.

Las siguientes son actividades que se deben considerar y realizar en la planta de desmedulado:

- ✓ Conocer, entender y aplicar la Política ambiental, y cooperar activamente en su implementación en los sitios de trabajo.

- ✓ Identificar los elementos y aspectos del área que puedan generar algún impacto en el medio ambiente, tomar las medidas pertinentes para minimizarlos y controlarlos, prioritariamente donde se generan.
- ✓ Mantener el sitio de trabajo, el equipo y la herramienta en condiciones limpias y seguras.
- ✓ Conocer, entender y aplicar los Procedimientos Operacionales Estándar, los procedimientos de trabajo seguro y las hojas de información de peli-gros químicos, con el fin de entender los riesgos y sus efectos en la salud y el Medio Ambiente.
- ✓ Informar al jefe inmediato sobre cualquier accidente o incidente ambiental, investigar las causas y tomar las acciones preventivas y correctivas para evitar su incidencia y ocurrencia.
- ✓ Comunicar a los superiores y exigir respuesta acerca de los aspectos que considere que son fuente de riesgos para la Seguridad, la Salud y el Medio Ambiente.
- ✓ Generar ideas de mejoramiento continuo, verificar que en los proyectos se tengan en cuenta las regulaciones y parámetros ambientales requeridos por la Compañía y las entidades reguladoras.
- ✓ Conocer la utilización óptima de los recursos, la minimización y control de emisiones, vertimientos y residuos.
- ✓ Suspender por causas razonables trabajos o procesos que presenten aspectos significativos adversos para el Medio Ambiente, la Salud y la Seguridad del recurso humano.
- ✓ Prevenir fugas y derrames de fibra, productos químicos, materias primas, bagazo, polvillo, aceites y grasas hacia el sistema de tratamiento de aguas residuales que ocasionen alteraciones de las condiciones necesarias para el funcionamiento del sistema, tales como cambios de PH, disminución del oxígeno necesario para la supervivencia de los microorganismos que degradan la materia orgánica y el aumento los límites ambientales permisibles que afecten las especies vivientes en los ríos.

✓ Reportar y corregir las emisiones incontroladas a la atmósfera como material particulado, gases de combustión y olores ofensivos que alteran la calidad del aire, con efectos sobre la salud y el ambiente.

✓ El manejo deficiente de los residuos sólidos en cuanto a generación, manipulación, acumulación, transporte y disposición, conllevan a generación de impactos visuales, olores y emisiones que afectan al entorno. Dicho esto, es necesario desarrollar acciones para minimizar la generación de residuos sólidos reciclándolos y reutilizándolos.

✓ En los sitios de muestreo debemos recolectar los excedentes de muestra y llevarlos a los puntos de recuperación para evitar la contaminación de los efluentes.

**Cuadro 7. Matriz de aspectos e impacto ambientales**

PROCESO	ACTIVIDAD	SITUACIÓN	ASPECTO	IMPACTO	TIPO DE IMPACTO	RECURSO	DURACIÓN	CONTROL OPERACIONAL
Desmedulado	Separación de fibra y polvillo	NORMAL	Reducción de partículas liberadas a la atmósfera	REDUCCIÓN DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA	POSITIVO (+)	AIRE	Permanente	Sistema de filtrado de partículas en la planta
		NORMAL	Consumo de energía eléctrica	AGOTAMIENTO DE LOS RECURSOS NATURALES	NEGATIVO (-)	ENERGÉTICO	Permanente	Control de la carga en los equipos desmeduladores
		NORMAL	Generación de ruido	CONTAMINACIÓN SONORA	NEGATIVO (-)	AIRE	Permanente	Sistema de amortiguamiento acústico
Compactado	Compactado del bagazo desmedulado	NORMAL	Prevención de liberación de partículas al medio ambiente mediante el transporte del bagazo.	REDUCCIÓN DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA	POSITIVO (+)	TODOS	Permanente	Sistema de gestión de medio ambiente
Cargue	Deposito de bagazo compactado a los bagones transportadores del bagazo desmedulado	NORMAL	Emisión de partículas al medio ambiente	CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA	NEGATIVO (-)	TODOS	Permanente	Sistema de gestión de medio ambiente
Transporte de bagazo desmedulado	Uso de vehículo para el transporte de bagazo desmedulado.	NORMAL	Generación de emisiones atmosféricas por fuentes móviles.	CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA	NEGATIVO (-)	AIRE	Permanente	Programa de control de emisiones atmosféricas
Gestión de recursos físicos	Adecuación de áreas, puestos de trabajo y mantenimiento de las instalaciones eléctricas	ANORMAL	Generación de residuos peligrosos como balastos, bombillas y similares	CONTAMINACIÓN DE SUELO	NEGATIVO (-)	SUELO	Trimestral	Programa de gestión de residuos sólidos.
	Mantenimiento preventivo y correctivo de los equipos.	ANORMAL	generación de residuos como: grasas, escombros, chatarra, trapos y similares	CONTAMINACIÓN DE SUELO	NEGATIVO (-)	SUELO	Ocasional	Programa de gestión de residuos sólidos.

En el Cuadro 7, se detalla la información de los aspectos e impactos ambientales presentes en la planta de desmedulado de manera sectorizada, según el área correspondiente se muestra la actividad del área, su situación de acuerdo a su recurrencia, el aspecto, el impacto ambiental, el recurso el cual se protege o hace daño, la duración del impacto y el control que se realiza en la planta respecto al mismo.

**7.2.2. Diagramas.** En esta etapa se da una descripción gráfica del flujo de materia prima en la planta de desmedulado y suministro a la empresa papelería, por medio de:

**Diagrama de Bloques,** es una representación gráfica y abreviada de la relación causa y efectos entre la entrada y la salida de un sistema físico. Proporciona un medio útil y conveniente para caracterizar las relaciones funcionales entre diversos elementos de un sistema.

**Diagrama de Flujo de Material,** Es la representación gráfica de un algoritmo o proceso en el cual se señala la dirección de flujo de la información y/o materia prima.

#### 7.2.2.1. Modelo de flujo de la planta de desmedulado

Figura 11. Modelo de Flujo de la planta de desmedulado

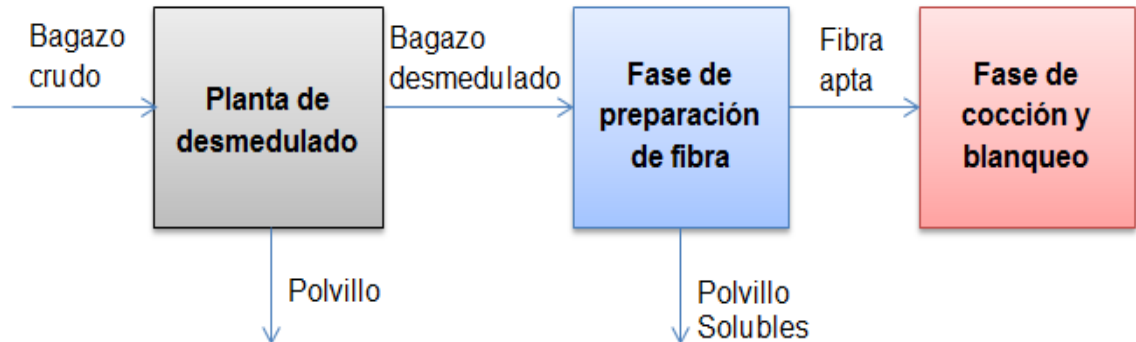


En la Figura 11, se presenta la dirección en que fluyen las materias primas y su transformación a través en la planta desmedulado, es decir, el central azucarero suministra bagazo crudo o entero (subproducto de procesos de producción de azúcar) a la empresa papelera dentro de sus instalaciones por medio de la planta de desmedulado, donde se le realiza el primer proceso de limpieza antes de ser enviado a la planta de producción de papel.

Una vez el bagazo entero entra a la planta de desmedulado es sometido a un proceso del cual se obtiene bagazo desmedulado y polvillo (cenizas y medula), los cuales son enviados posteriormente a la empresa productora de papel y a las calderas del central azucarero respectivamente.

### 7.2.2.2. Diagrama de bloques del área de fibra y pulpa en la empresa productora de papel.

Figura 12. Área de Pulpa y blanqueo en la Empresa Productora de Papel

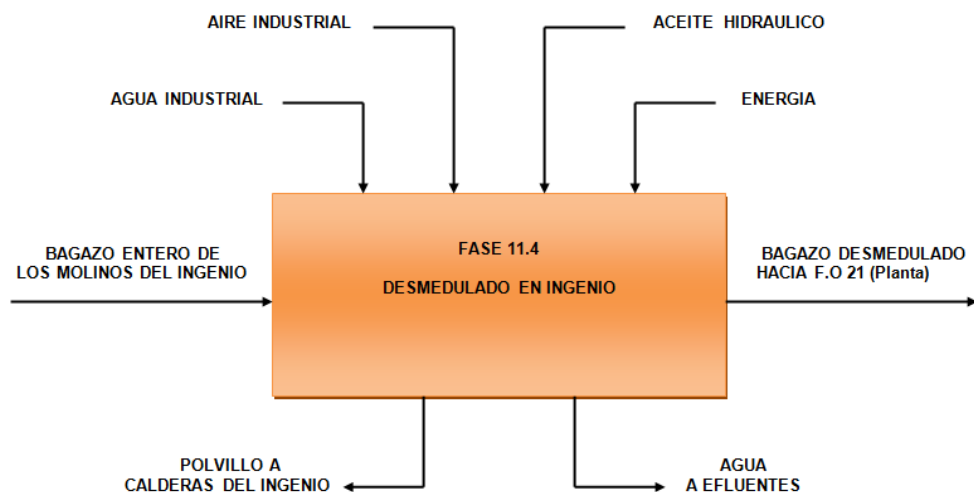


**Fuente:** FO 12.2 Manual de Desmedulado. Santiago de Cali, 2013. 1 archivo de computador.

En la Figura 12, se muestra las etapas del área encargada de la extracción y limpieza de la fibra apta para la producción de pulpa y papel en la empresa papelera (Área de pulpa y blanqueo), esta área va desde el aprovisionamiento de bagazo entero en la planta de desmedulado, hasta el suministro de la pulpa blanqueada para la producción del papel.

### 7.2.2.3. Diagrama de bloques de la planta de desmedulado.

Figura 13. Diagrama de entrada y salidas de la Planta de Desmedulado

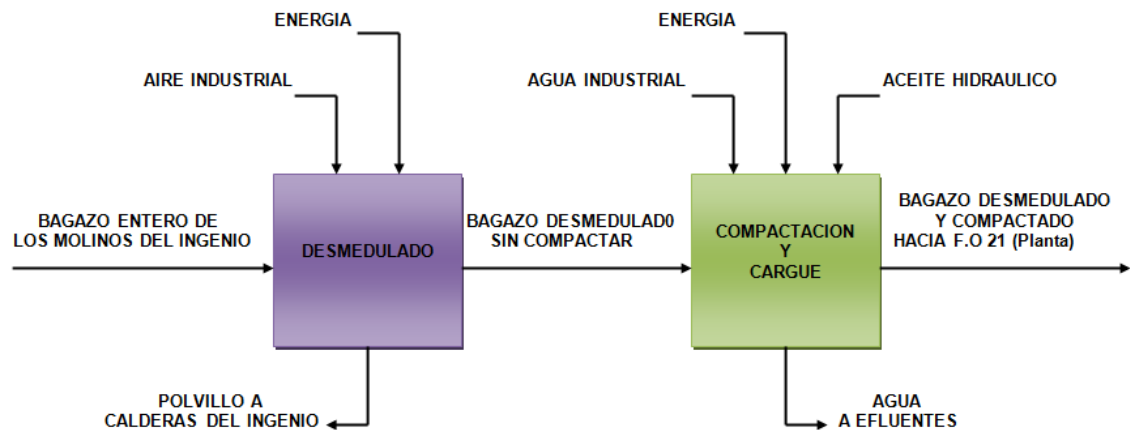


**Fuente:** FO 12.2 Manual de Desmedulado. Santiago de Cali, 2013. 1 archivo de computador.

En la Figura 13, se representa las entradas y salidas de la fase de desmedulado en el central azucarero, como también los recursos y residuos de los procesos.

#### 7.2.2.4. Diagrama funcional de la planta de desmedulado

Figura 14. Diagrama funcional de bloques de la planta de desmedulado



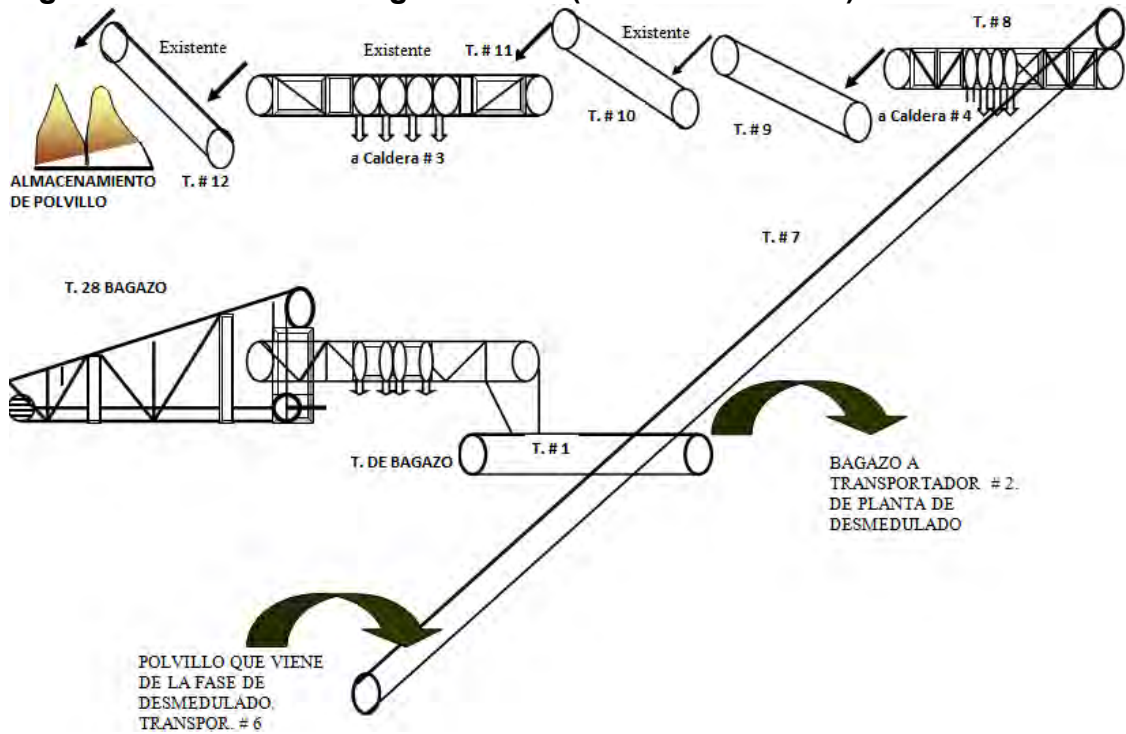
**Fuente:** FO 12.2 Manual de Desmedulado. Santiago de Cali, 2013. 1 archivo de computador.

En la Figura 14 se muestran las sub-fases de la planta de desmedulado con sus entradas, salidas, recursos y residuos, como también la relación entre ellas.

#### 7.2.2.5. Diagrama de proceso de bagazo en la planta de desmedulado

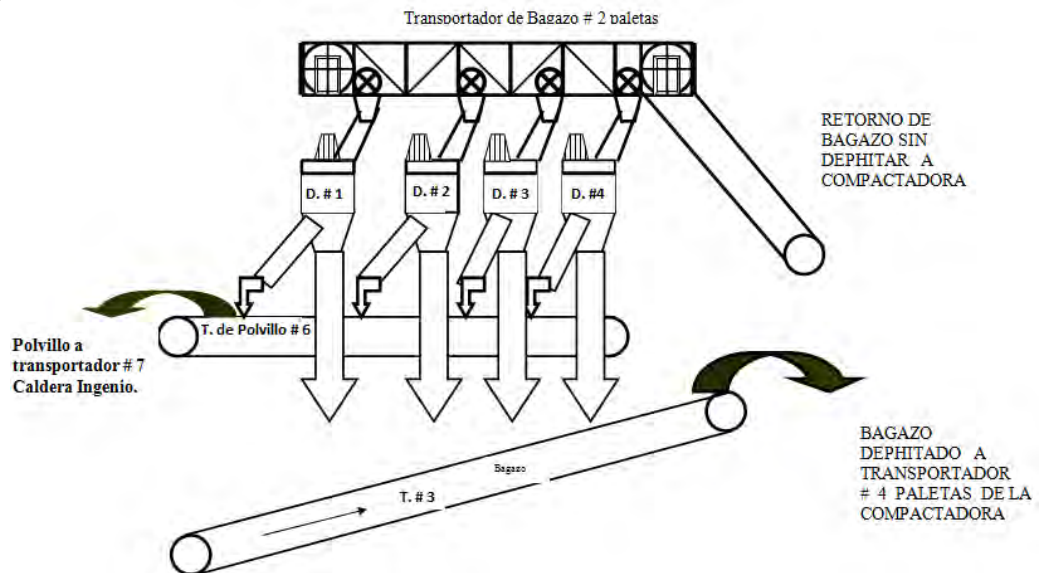
En las siguientes figuras (15, 16 y 17), se muestra el flujo del bagazo entero desde que es entregado por el central azucarero, pasando por su transformación a bagazo desmedulado y polvillo, hasta que son depositados en los camiones de carga y en las calderas del central azucarero, respectivamente.

**Figura 15. Proceso de bagazo Fase 1(central azucarero)**



**Fuente:** Nuevo diagrama de flujo de cargue de fibra (desmedulado). Santiago de Cali, 2013. 1 archivo de computador.

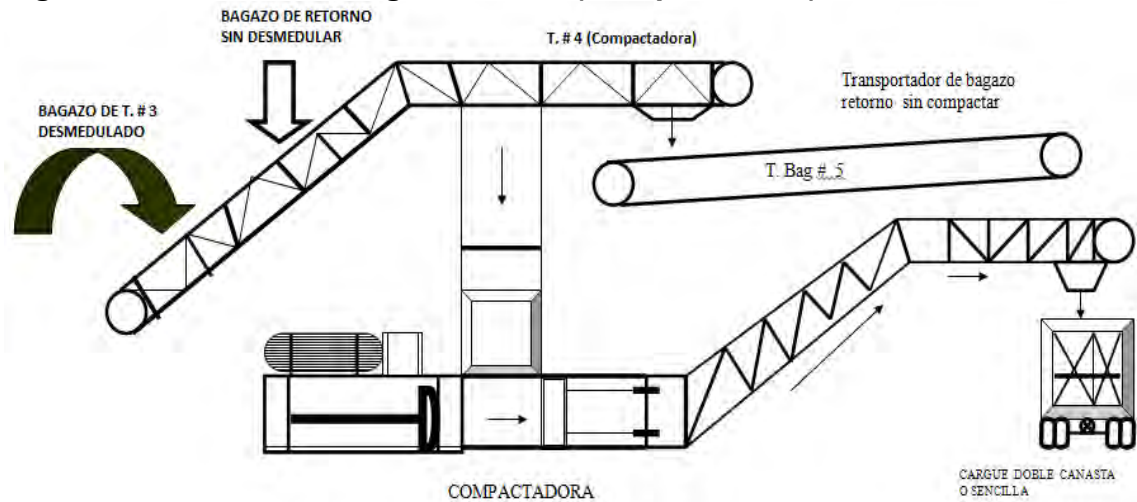
**Figura 16. Proceso de bagazo Fase 2 (Desmedulado)**



**Fuente:** Nuevo diagrama de flujo de cargue de fibra (desmedulado). Santiago de Cali, 2013. 1 archivo de computador.



**Figura 17. Proceso de bagazo Fase 3 (Compactadora)**

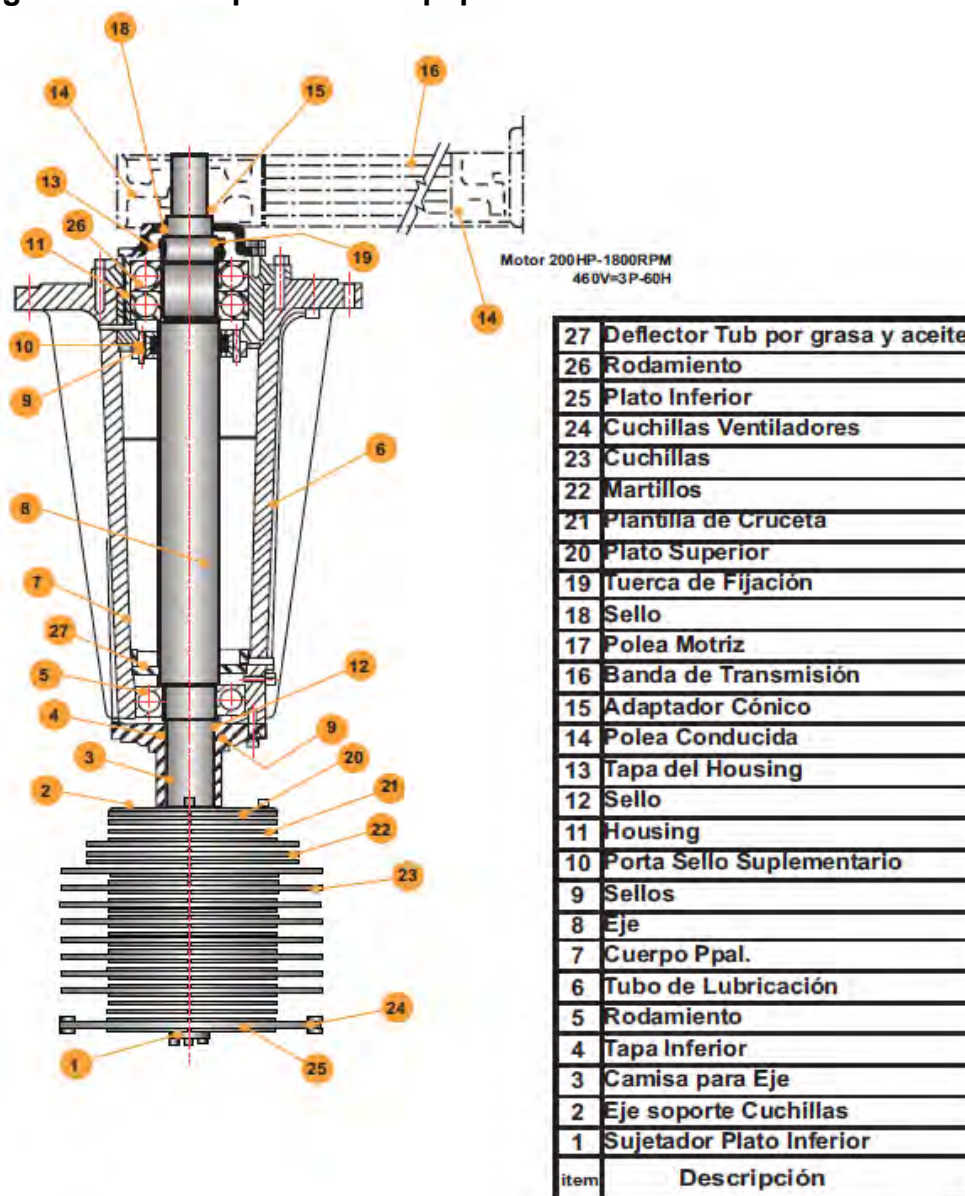


**Fuente:** Nuevo diagrama de flujo de cargue de fibra (desmedulado). Santiago de Cali, 2013. 1 archivo de computador.

**7.2.3. Detalle de herramienta.** En esta etapa se presentan los elementos que hacen parte del proceso de desmedulado, sus funciones, componentes y dimensiones.

**7.2.3.1. Equipo desmedulador.** Es el encargado de separar la medula o polvillo de la fibra del bagazo de la caña de azúcar (Figura 18).

**Figura 18. Descripción del Equipo Desmedulador**

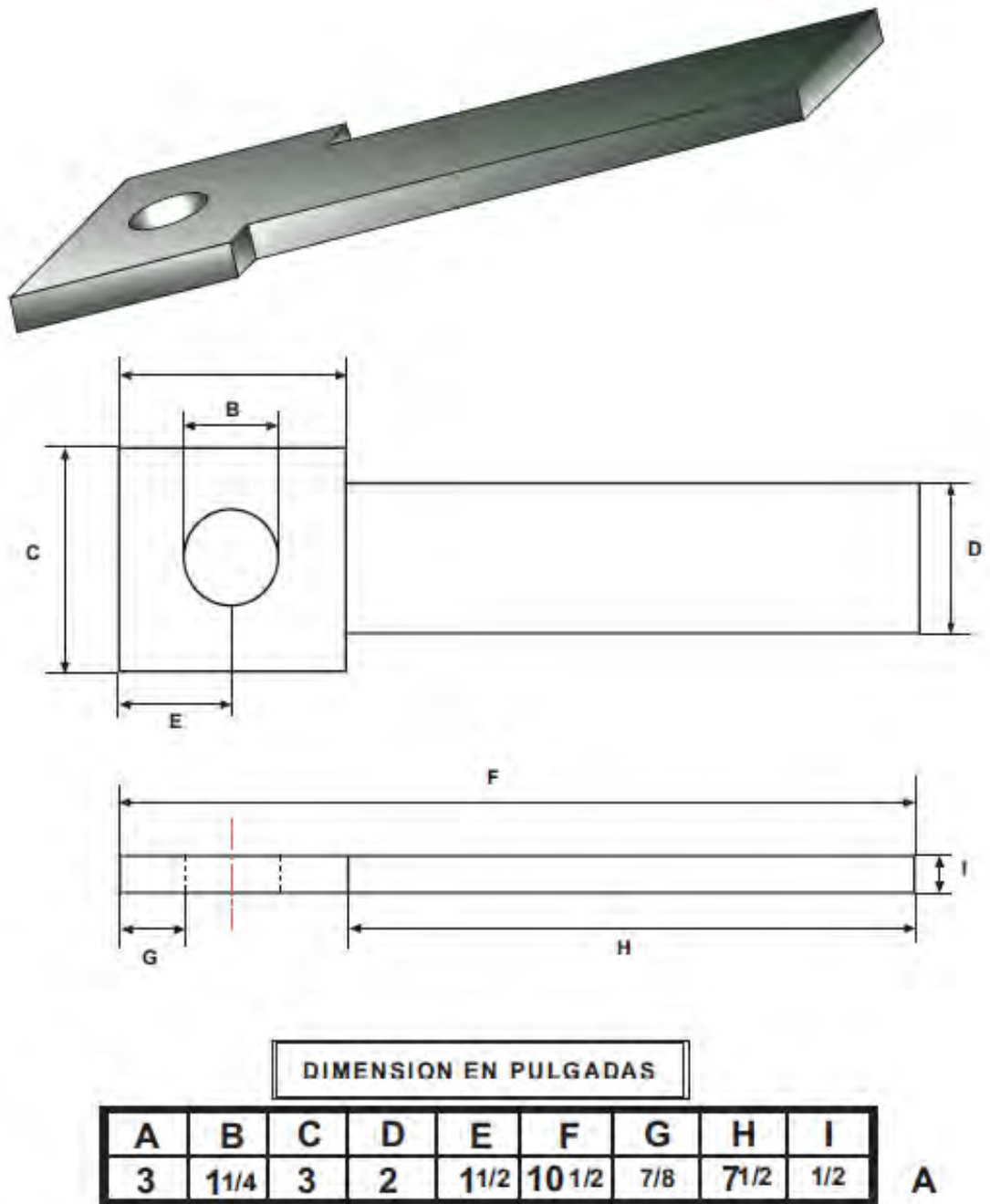


**Fuente:** FO 12.2 Manual de Desmedulado. Santiago de Cali, 2013. 1 archivo de computador.

**7.2.3.2. Cuchillas.** Las cuchillas o martillos son los elementos encargados de generar el choque entre el bagazo entero y la criba con el fin de separar la medula o polvillo de la fibra apta para el proceso de producción de pulpa y papel. Actualmente existen dos tipos de cuchillas las cuchillas planas (Figura 19) y las cuchillas ventiladoras (Figura 20).

☒ **CUCHILLAS PLANAS**

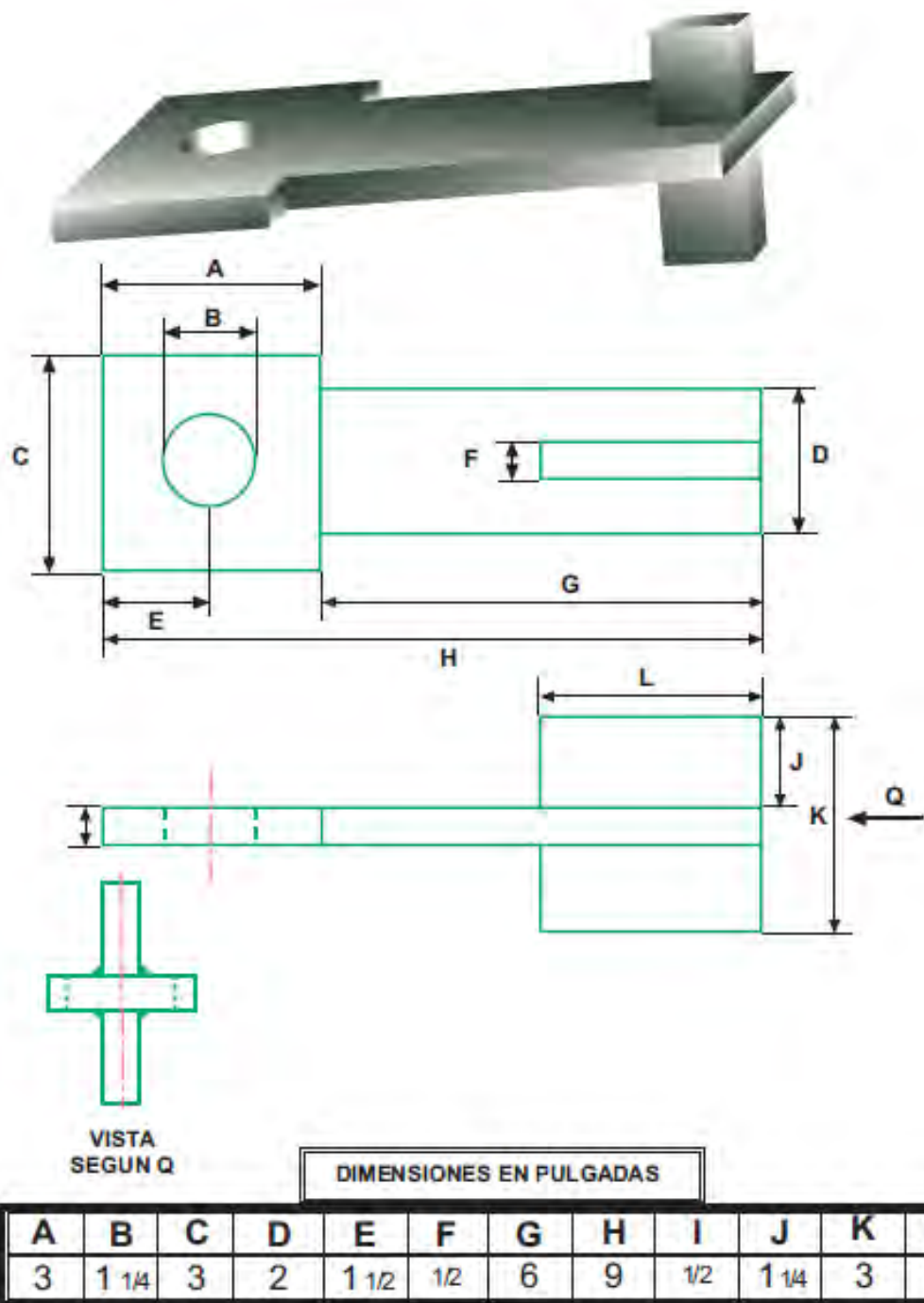
Figura 19. Detalle de Cuchilla Plana



**Fuente:** FO 12.2 Manual de Desmedulado. Santiago de Cali, 2013. 1 archivo de computador.

☑ **Cuchillas ventiladoras**

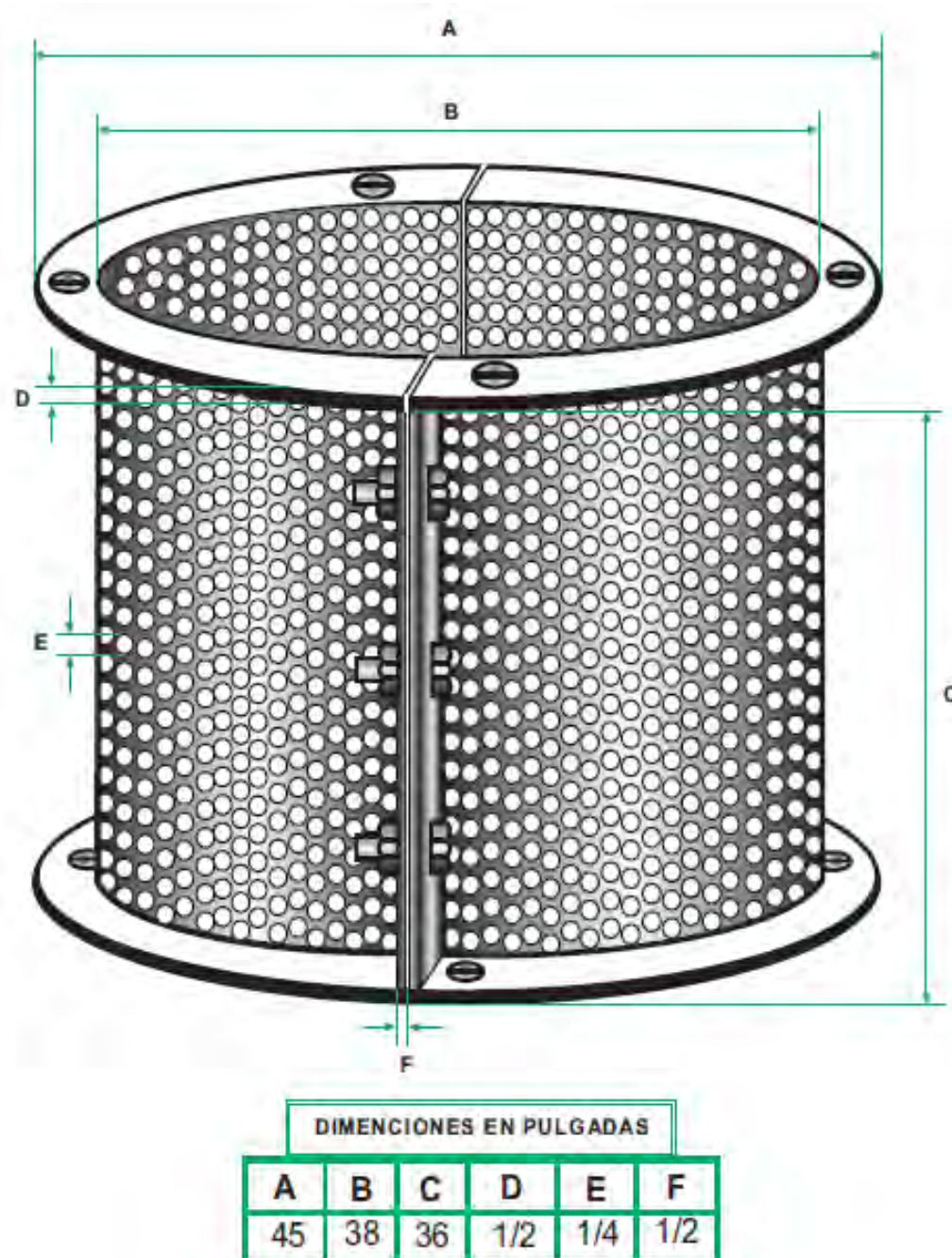
Figura 20. Detalle Cuchilla Ventiladora



**Fuente:** FO 12.2 Manual de Desmedulado. Santiago de Cali, 2013. 1 archivo de computador.

**7.2.3.3. Criba.** Las cribas son elementos con agujeros circulares encargados de retener la fibra apta una vez se da el choque del bagazo entero sobre su superficie, dejando pasar la medula o polvillo.

Figura 21. Detalle Criba

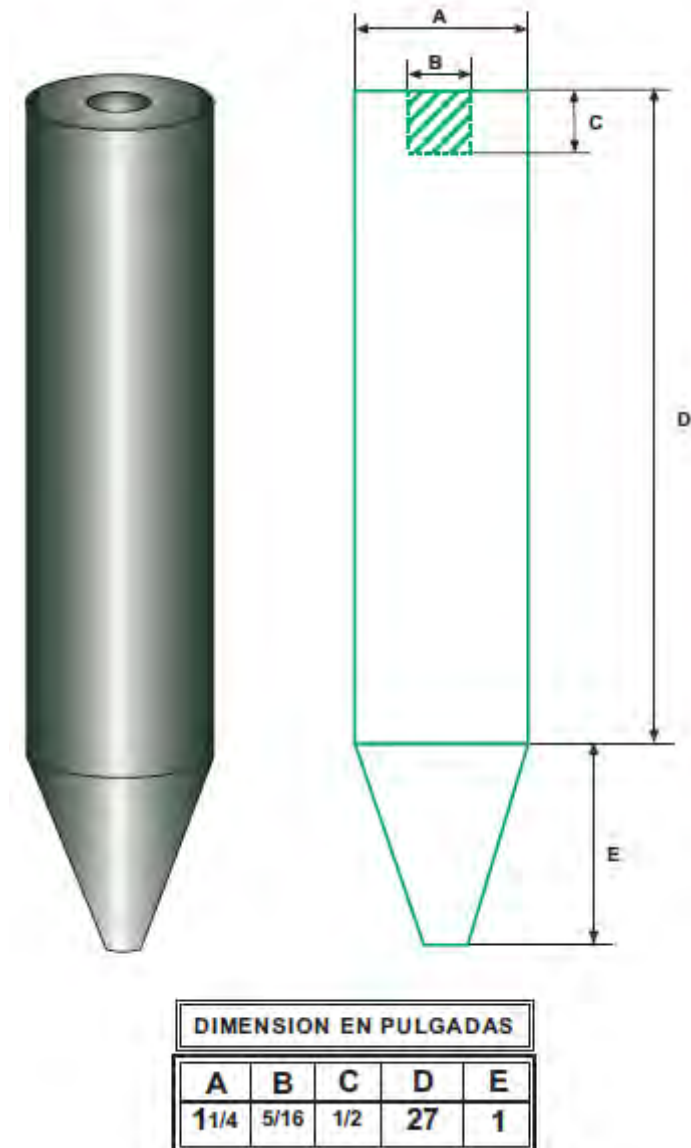


**Fuente:** FO 12.2 Manual de Desmedulado. Santiago de Cali, 2013. 1 archivo de computador.



**7.2.3.4. Eje porta cuchillas.** Es el elemento encargado de mantener las cuchillas sobre el rotor desmedulador; también llamado piña.

**Figura 22. Detalle Eje Porta cuchillas**



**Fuente:** FO 12.2 Manual de Desmedulado. Santiago de Cali, 2013. 1 archivo de computador.

### 7.3. ETAPA 3: DISEÑO ESTADISTICO DE EXPERIMENTO

Se realizarán tres (3) tipos de diseños estadísticos de experimento, con el fin de analizar el mayor número de configuraciones posibles en el equipo desmedulador.

Los diseños que se desarrollarán son:

**Diseño completamente al azar (DCA)**, es un diseño experimental sin restricciones de aleatoriedad y se ajusta a cualquier número de tratamientos, cada uno con igual o diferente número de repeticiones.

Con el fin de evaluar cuales son las configuraciones de cuchillas que maximiza el contenido de fibra en el bagazo desmedulado y minimiza el contenido de fibra en el polvillo. Dicho esto, Este diseño se realizará por el gran número de configuraciones de cuchillas posibles dentro de la piña (de 4 a 52 cuchillas de igual tipo o combinación entre los mismos).

**Diseño factorial 2x2**, son experimentos de 2 factores cada uno con dos niveles que permiten analizar y conocer la variable de mayor influencia sobre la variable respuesta.

A partir de los resultados obtenidos en el DCA tomamos las dos configuraciones de mejor resultados de contenido de fibra en el bagazo desmedulado y contenido de fibra en el polvillo, y se analizará el efecto que tiene estas al interactuar con la apertura de alimentación de bagazo entero; lo que nos permite conocer el comportamiento del sistema de acuerdo a los niveles del diseño.

**Diseño factorial con tres factores**, permite el estudio de tres factores cada uno con igual o diferente número de niveles.

Se desarrollará este diseño con el fin de analizar el comportamiento del sistema bajo tres condiciones (niveles) de apertura de alimentación de bagazo entero, y al cambiar la dimensión de los agujeros de la criba.

**7.3.1. Diseño completamente al AZAR (DCA).** El objetivo de este estudio es comparar si alguna nueva configuración que se propone es mejor o igual a la configuración utilizada actualmente (28 cuchillas ventiladoras, criba con agujeros de 5/16' y apertura de alimentación de bagazo desmedulado al 50%); en este caso, la variable de interés es el contenido de fibra en el bagazo desmedulado. No obstante, es muy importante para la empresa productora de papel que el contenido de fibra en el polvillo sea mínimo.

La estrategia natural es obtener una muestra representativa de mediciones (restringida por la capacidad de análisis en el laboratorio) en cada uno de los tratamientos, y construir un estadístico de prueba para determinar si estos son iguales estadísticamente en cuanto a sus medias, en oposición a la alternativa de que al menos dos de ellos son diferentes.

$$\begin{aligned} H_o: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k = \mu \\ H_A: \mu_i \neq \mu_j \text{ para algún } i \neq j \end{aligned} \quad (E1)$$

O

$$\begin{aligned} H_o: \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_k = 0 \\ H_A: \tau_i \neq 0 \text{ para algún } i \end{aligned} \quad (E2)$$

Donde  $\tau_i = \mu_i - \mu$  y corresponde al efecto del tratamiento  $i$  sobre el contenido de fibra en el bagazo desmedulado y el contenido de fibra en el polvillo.

Se realizará un DCA con  $k=26$  y  $n=4$ , en el cual se varía el factor principal (Tipo y cantidad de cuchillas) manteniendo constantes los demás factores (Apertura de alimentación de bagazo entero, dimensión de los agujeros de la criba).

Los tratamientos a desarrollar se muestran en el siguiente cuadro:



**Cuadro 8. Tratamientos del DCA – Comparación de configuración de cuchillas**

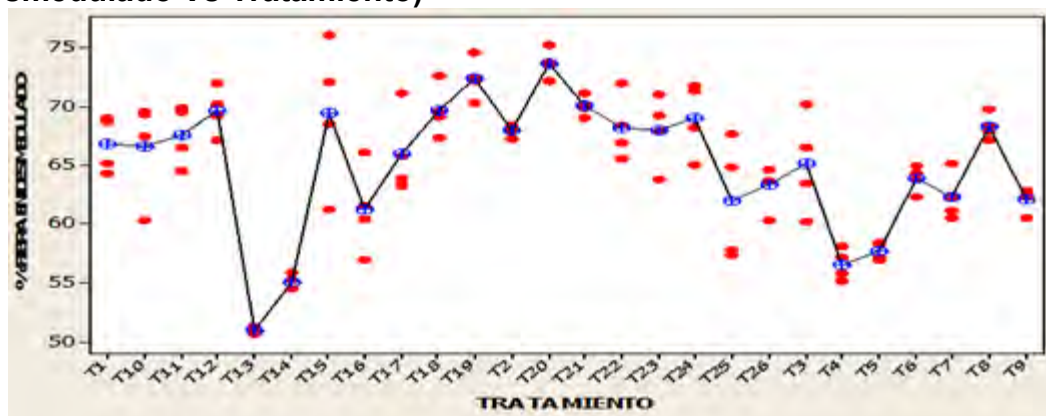
Tratamiento	LINEA DE DESMEDULADO No. 2		Tratamiento	LINEA DE DESMEDULADO No. 3	
	PLANAS	VENTILADORAS		PLANAS	VENTILADORAS
T1	12		T2	20	
T3	20		T4	28	
T5	24		T6	12	
T7		12	T8		20
T9		20	T10		24
T11		24	T12		28
T13	4		T14		4
T15	12		T16		12
T17	20		T18		20
T19	16	8	T20		28
T21	20	4	T22	28	
T23	20	8	T24	24	4
T25	28	4	T26	24	8

Los resultados de las variables respuesta se muestran en las siguientes tablas.

**Tabla 2. Resultado del DCA en el bagazo desmedulado**

CONTENIDO DE FIBRA EN EL BAGAZO DESMEDULADO (%)				
k \ n	1	2	3	4
T1	68.97	68.63	65.15	64.26
T2	68.35	67.24	68.12	67.89
T3	66.52	60.21	70.10	63.41
T4	58.04	55.75	57.14	55.15
T5	58.43	57.12	56.89	58.33
T6	64.94	62.26	63.76	64.32
T7	61.15	65.07	62.25	60.46
T8	67.85	68.33	67.14	69.67
T9	62.81	62.26	60.50	62.70
T10	67.37	69.30	60.30	69.53
T11	69.55	66.42	69.81	64.43
T12	70.11	69.16	67.09	71.95
T13	51.27	51.07	50.87	50.60
T14	54.52	54.48	55.89	55.21
T15	71.99	61.28	76.05	68.46
T16	60.38	56.97	66.05	61.57
T17	71.10	63.82	63.22	65.78
T18	69.54	72.50	67.34	69.07
T19	72.49	72.15	70.20	74.53
T20	72.09	73.48	73.64	75.16
T21	69.85	68.95	70.07	71.10
T22	66.93	68.34	65.55	71.87
T23	67.82	69.21	70.95	63.75
T24	65.02	71.30	71.66	68.14
T25	64.83	57.40	57.80	67.62
T26	63.67	60.31	64.62	64.56

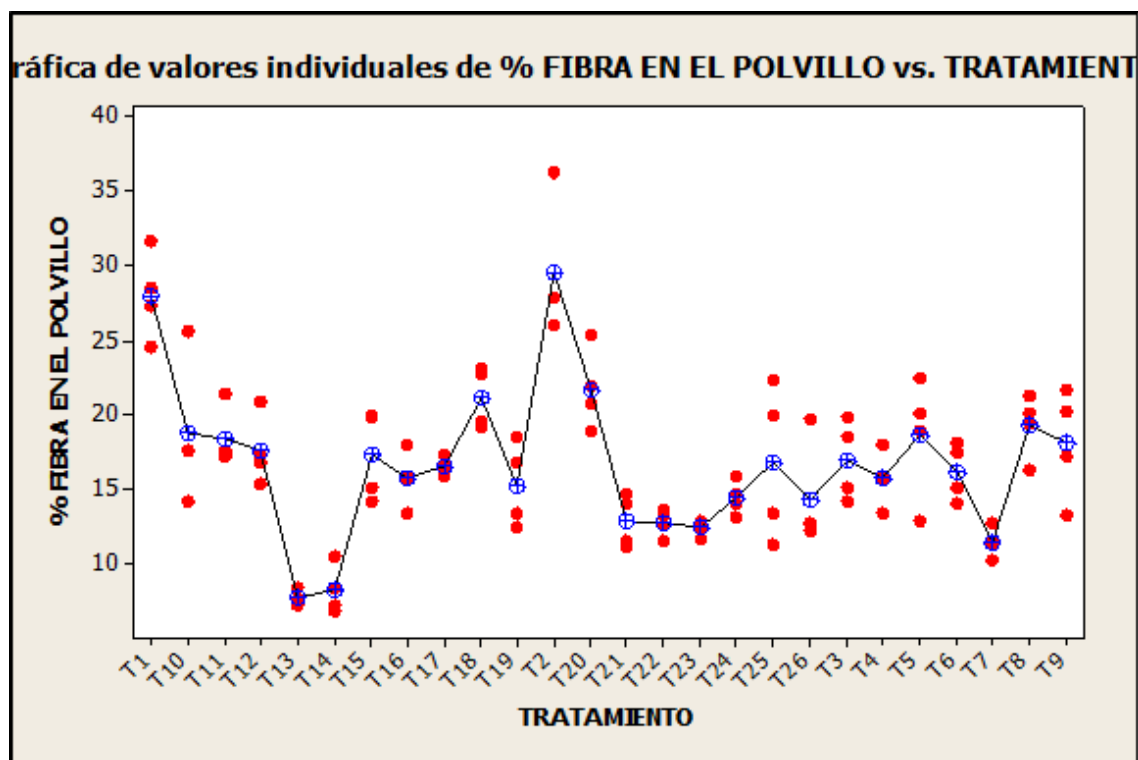
**Figura 23. Gráfico de valores individuales del contenido de fibra en el bagazo desmedulado por tratamiento (% de fibra en el bagazo desmedulado Vs Tratamiento)**



**Tabla 3. Resultados de DCA en el polvillo**

CONTENIDO DE FIBRA EN EL POLVILLO (%)				
k \ n	1	2	3	4
T1	24.61	28.46	27.34	31.69
T2	27.86	26.05	36.31	27.78
T3	18.5	19.88	15.09	14.21
T4	18.04	15.82	13.4	15.64
T5	22.5	20.14	12.82	18.91
T6	15.07	14.05	18.17	17.46
T7	11.33	12.71	11.42	10.27
T8	19.37	20.13	21.26	16.24
T9	20.21	21.61	13.24	17.14
T10	14.22	17.61	17.65	25.56
T11	17.34	17.53	21.46	17.13
T12	15.38	17.31	16.83	20.92
T13	7.66	8.4	7.16	7.64
T14	6.87	10.43	8.41	7.15
T15	19.99	19.88	15.09	14.21
T16	18.04	15.82	13.4	15.64
T17	16.09	15.87	17.3	16.7
T18	19.53	22.75	23.1	19.17
T19	13.37	16.84	18.54	12.4
T20	18.93	21.89	25.35	20.69
T21	14.09	11.5	14.69	11.17
T22	13.71	13.2	12.58	11.55
T23	12.7	11.73	12.39	12.81
T24	14.65	13.06	15.94	14.01
T25	19.98	11.31	22.35	13.42
T26	12.19	19.71	12.69	12.53

**Figura 24. Gráfico de valores individuales de contenido de fibra en el polvillo por tratamiento**



A partir de la información de la Tabla No. 2 se realizan los cálculos necesarios para el análisis de varianza (ver Tabla No. 4) que se muestra en el Cuadro No. 9.

**Cuadro 9. Datos para el cálculo del ANOVA en el contenido de fibra del bagazo desmedulado**

DATOS PARA ANOVA	
n=	4
k=	26
N=	104
$Y_{..} =$	6770.3
$\bar{Y}_{..} =$	65.1
$(Y_{..})^2 =$	45836691.3
$(Y_{..})^2/N =$	440737.4

**Tabla 4. Cálculos para el ANOVA del contenido de fibra en el bagazo desmedulado**

CALCULOS ANOVA PARA CONTENIDO DE FIBRA EN EL BAGAZO DESMEDULADO						
i	$\mu_i$	$Y_i$	$\bar{Y}_i$	$(Y_i)^2$	$(Y_i)^2/n_i$	$\tau_i$
1	66.8	267.0	66.8	71294.3	17823.6	1.65
2	67.9	271.6	67.9	73766.6	18441.6	2.80
3	65.1	260.2	65.1	67724.9	16931.2	-0.04
4	56.5	226.1	56.5	51112.2	12778.0	-8.58
5	57.7	230.8	57.7	53254.8	13313.7	-7.41
6	63.8	255.3	63.8	65167.9	16292.0	-1.28
7	62.2	248.9	62.2	61966.1	15491.5	-2.87
8	68.2	273.0	68.2	74523.5	18630.9	3.15
9	62.1	248.3	62.1	61638.0	15409.5	-3.03
10	66.6	266.5	66.6	71022.3	17755.6	1.53
11	67.6	270.2	67.6	73013.4	18253.4	2.45
12	69.6	278.3	69.6	77456.5	19364.1	4.48
13	51.0	203.8	51.0	41538.5	10384.6	-14.15
14	55.0	220.1	55.0	48444.0	12111.0	-10.07
15	69.4	277.8	69.4	77161.7	19290.4	4.35
16	61.2	245.0	61.2	60010.3	15002.6	-3.86
17	66.0	263.9	66.0	69653.8	17413.4	0.88
18	69.6	278.5	69.6	77534.4	19383.6	4.51
19	72.3	289.4	72.3	83735.0	20933.7	7.24
20	73.6	294.4	73.6	86653.7	21663.4	8.49
21	70.0	280.0	70.0	78383.2	19595.8	4.89
22	68.2	272.7	68.2	74359.8	18590.0	3.07
23	67.9	271.7	67.9	73837.2	18459.3	2.83
24	69.0	276.1	69.0	76242.3	19060.6	3.93
25	61.9	247.7	61.9	61330.5	15332.6	-3.19
26	63.3	253.2	63.3	64090.0	16022.5	-1.81

**Cuadro 10. ANOVA - Contenido de fibra en el bagazo desmedulado**

ANOVA - BAGAZO DESMEDULADO					
Fuente de variabilidad	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F0	Valor-p
TRATAMIENTOS	2991.3	25	119.65	15.79	3.1E-21
ERROR	590.9	78	7.58		
TOTAL	3582.2	103			

Con un nivel de significancia  $\alpha = 0.05$ ,  $F_{0.05,25,78} \approx 1.664$  (ver Anexo No. 2); dado que  $F_0 > F_{0.05,25,78}$  y/o  $\alpha > \text{Valor-p}$ , se rechaza la hipótesis nula  $[H_0]$  (E1) con lo cual se concluye que sí existe diferencia o efecto entre las configuraciones de cuchillas en cuanto al contenido de fibra promedio en el bagazo desmedulado y que al menos un efecto es diferente de cero (E2). Dicho esto, las observaciones de la Tabla No. 1 se podrán describir con el modelo estadístico lineal dado por  $Y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij}$ ; donde  $\mu$  es la media global,  $\tau_i$  es un parámetro que mide el efecto del tratamiento  $i$ , y  $\varepsilon_{ij}$  es el error causado por la medición  $Y_{ij}$ .

A partir de la información de la Tabla No. 4 se realizan los cálculos necesarios para el análisis de varianza (ver Cuadro 10) que se muestra en el Cuadro No. 11.

Cuadro 11. Datos para el cálculo del ANOVA del contenido de fibra en el Polvillo

DATOS PARA ANOVA	
n=	4
k=	26
N=	104
$Y_{..} =$	1741.9
$\bar{Y}_{..} =$	16.7
$(Y_{..})^2 =$	3034355.0
$(Y_{..})^2/N =$	29176.5

Tabla 5. Cálculos para el ANOVA del contenido de fibra en el Polvillo

ANOVA PARA CONTENIDO DE FIBRA EN EL POLVILLO						
i	$\mu_i$	$Y_{i\cdot}$	$\bar{Y}_{i\cdot}$	$(Y_{i\cdot})^2$	$(Y_{i\cdot})^2/n_i$	$t_i$
1	28.03	112.10	28.03	12566.41	3141.60	-37.07
2	29.50	118.00	29.50	13924.00	3481.00	-35.60
3	16.92	67.68	16.92	4580.58	1145.15	-48.18
4	15.73	62.90	15.73	3956.41	989.10	-49.37
5	18.59	74.37	18.59	5530.90	1382.72	-46.51
6	16.19	64.75	16.19	4192.56	1048.14	-48.91
7	11.43	45.73	11.43	2091.23	522.81	-53.67
8	19.25	77.00	19.25	5929.00	1482.25	-45.85
9	18.05	72.20	18.05	5212.84	1303.21	-47.05
10	18.76	75.04	18.76	5631.00	1407.75	-46.34
11	18.37	73.46	18.37	5396.37	1349.09	-46.73
12	17.61	70.44	17.61	4961.79	1240.45	-47.49
13	7.72	30.86	7.72	952.34	238.08	-57.38
14	8.22	32.86	8.22	1079.78	269.94	-56.88
15	17.29	69.17	17.29	4784.49	1196.12	-47.81
16	15.73	62.90	15.73	3956.41	989.10	-49.37
17	16.49	65.96	16.49	4350.72	1087.68	-48.61
18	21.14	84.55	21.14	7148.70	1787.18	-43.96
19	15.29	61.15	15.29	3739.32	934.83	-49.81
20	21.72	86.86	21.72	7544.66	1886.16	-43.38
21	12.86	51.45	12.86	2647.10	661.78	-52.24
22	12.76	51.04	12.76	2605.08	651.27	-52.34
23	12.41	49.63	12.41	2463.14	615.78	-52.69
24	14.42	57.66	14.42	3324.68	831.17	-50.68
25	16.77	67.06	16.77	4497.04	1124.26	-48.33
26	14.28	57.12	14.28	3262.69	815.67	-50.82

**Tabla 6. ANOVA - Contenido de fibra en el Polvillo**

ANOVA - POLVILLO					
Fuente de variabilidad	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F0	Valor-p
TRATAMIENTOS	2405.8	25	96.23	12.72	2.0E-18
ERROR	590.1	78	7.57		
TOTAL	2995.9	103			

Con un nivel de significancia  $\alpha = 0.05$ ,  $F_{0.05,25,78} \approx 1.664$  (ver Anexo No. 2); dado que  $F_0 > F_{0.05,25,78}$  y/o  $\alpha > \text{Valor-p}$ , se rechaza la hipótesis nula [ $H_0$ ] (E1) con lo cual se concluye que sí existe diferencia o efecto entre las configuraciones de cuchillas en cuanto al contenido de fibra promedio en el Polvillo y que al menos un efecto es diferente de cero (E2). Dicho esto, las observaciones de la Tabla No. 2 se podrán describir con el modelo estadístico lineal dado por  $Y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij}$ .

**7.3.1.1. Verificación de los supuestos del Modelo.** La validez de los resultados en cualquier análisis de varianza queda supeditada a que los supuestos del modelo se cumplan<sup>11</sup>.

Para comprobar si se cumplen los supuestos del modelo se hará uso de los residuos del mismo.

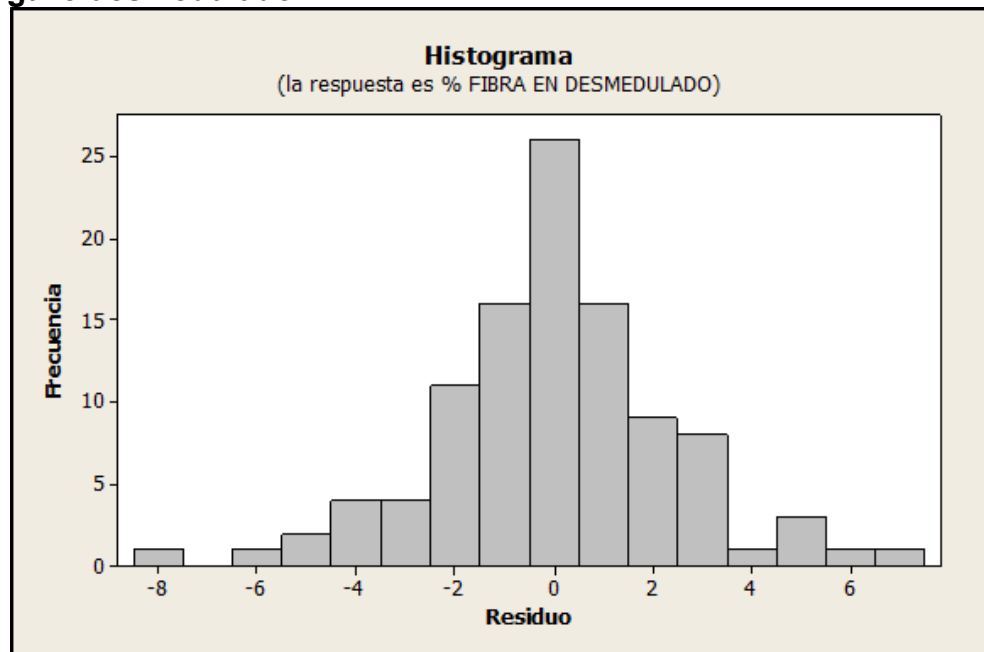
Los residuos ( $e_{ij}$ ) son la diferencia entre la respuesta observada ( $Y_{ij}$ ) y la respuesta predicha por el modelo ( $\hat{Y}_{ij}$ ), lo que permite realizar un diagnóstico directo de la calidad del modelo<sup>12</sup>.

<sup>11</sup> GUTIÉRREZ PULIDO, Humberto y DE LA VARA SALAZAR, Román. Análisis y diseño de experimentos. 3 ed. México: Mc Graw Hill, 2012. p68

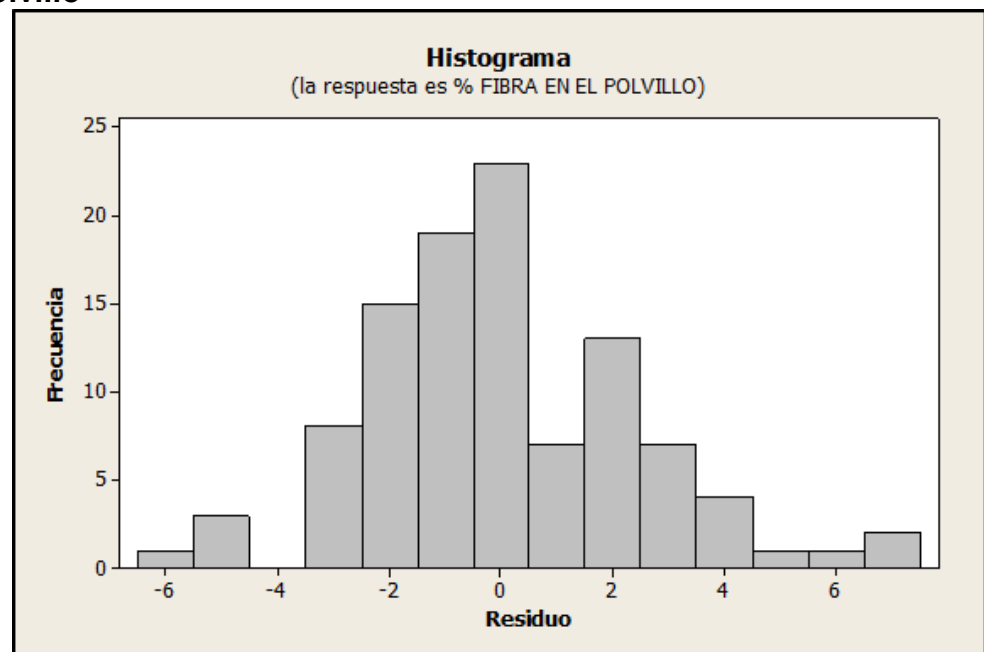
<sup>9</sup> IBID. 70p.

✓ Normalidad

**Figura 25. Gráfico de la distribución de los datos del contenido de fibra en el bagazo desmedulado**

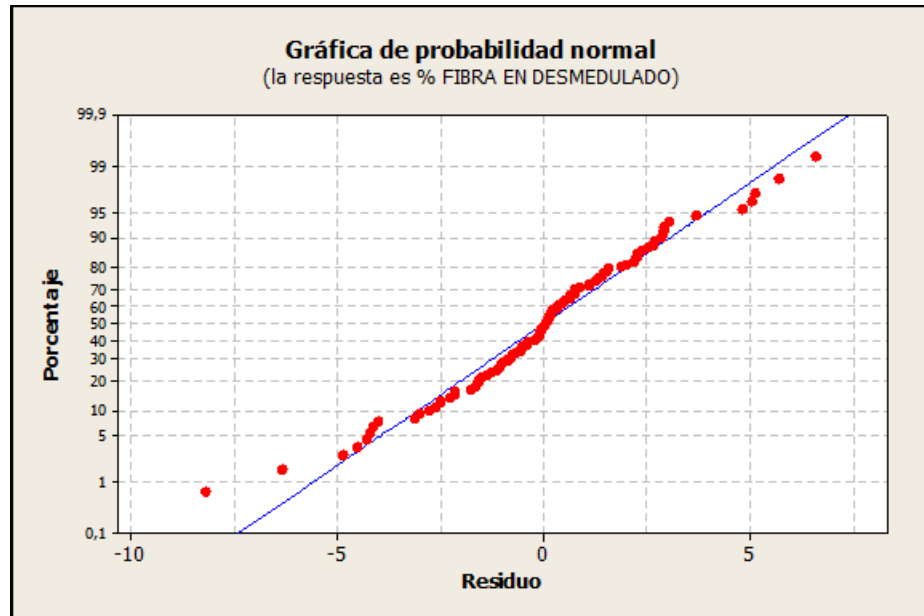


**Figura 26. Gráfico de la distribución de los datos del contenido de fibra en el polvillo**

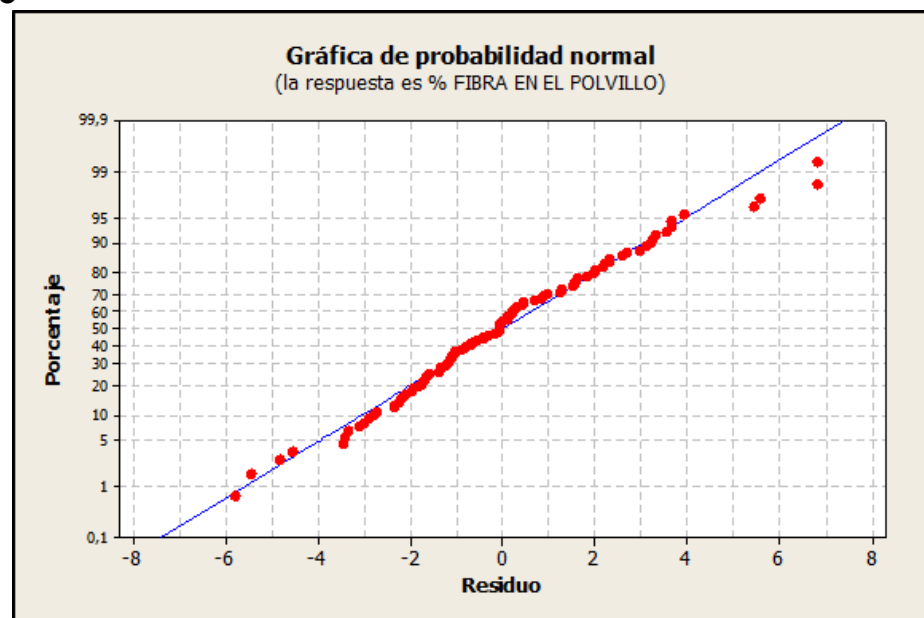


De las Figuras 25 y 26, se visualiza que los datos aparentemente cumplen una distribución normal (Campana de Gauss). Para verificar la distribución del modelo se realiza la gráfica de probabilidad normal (ver Figura 27 y Figura 28).

**Figura 27. Gráfica de probabilidad normal para el contenido de fibra en el bagazo desmedulado**



**Figura 28. Gráfica de probabilidad normal para el contenido de fibra en el polvillo**

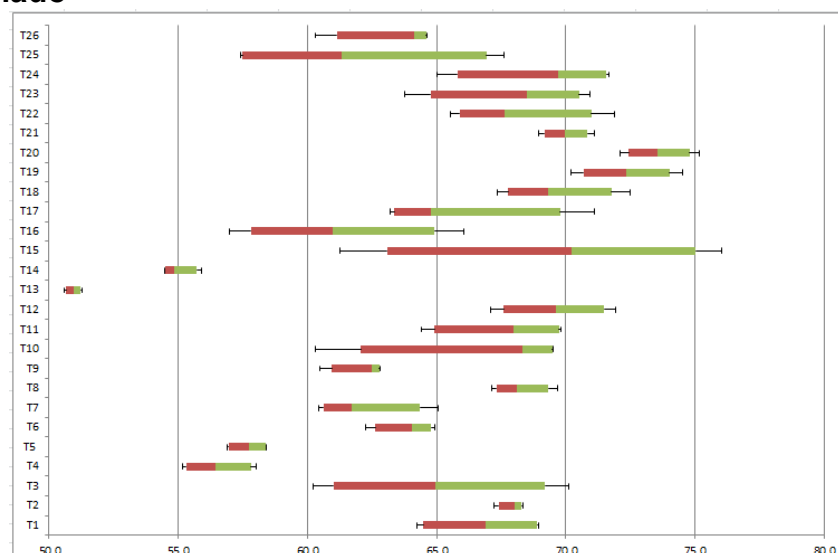


En la Figura 27 y Figura 28, se verifica que en los datos del contenido de fibra en el bagazo desmedulado y en el polvillo respectivamente, se cumple la normalidad al caer los residuos alineados sobre la gráfica de probabilidad normal.

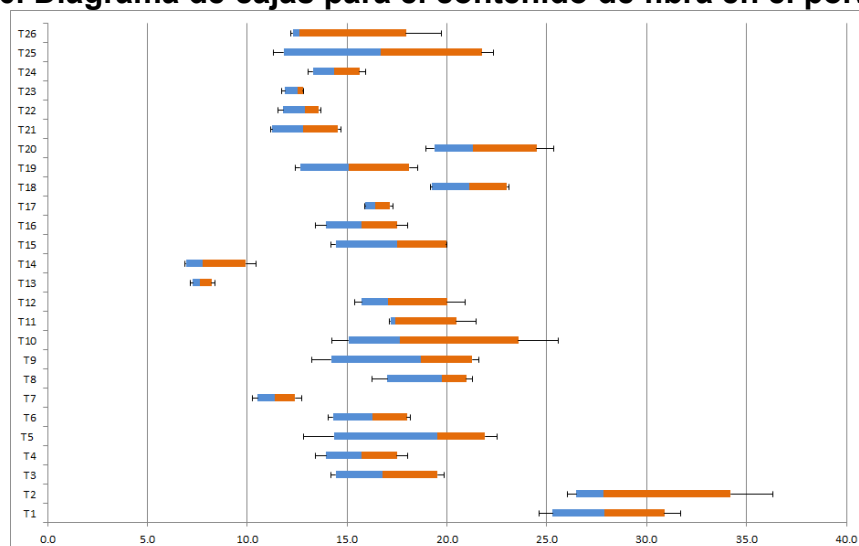


Con la información registrada en la Tabla 3 y la Tabla 4, se construyen los siguientes diagramas BOX – PLOT para los contenidos de fibra en el bagazo desmedulado y en el polvillo (ver Figura 29 y Figura 30).

**Figura 29. Diagrama de cajas para el contenido de fibra en el bagazo desmedulado**



**Figura 30. Diagrama de cajas para el contenido de fibra en el polvillo**



En la Figura 29, se observa que los tratamientos con mejores resultados en cuanto a su media son el T18, T19, T20 y T21; donde en el T20 se obtuvo mayor contenido promedio de fibra en el bagazo desmedulado y en el T21 menor variabilidad en los datos; No obstante, en la Figura 30, se observa que

el T21 es el tratamiento que minimiza el contenido de fibra en el polvillo y el T20 representa el tratamiento menos deseado (respecto a los otros tratamientos ya mencionados).

Para verificar si las diferencias que se observan en los diagramas de cajas anteriores es significativa, se realiza la prueba estadística de comparación de medias conocida como método de la diferencia mínima significativa (LSD) del cual se obtuvo:

**7.3.1.2. Ilustración de la Prueba LSD.** LSD es la diferencia mínima significativa que debe haber entre dos medias muestrales para considerar que dos tratamientos son diferentes, para ello se plantean las hipótesis:

$$\begin{aligned} H_0: \mu_i &= \mu_j \\ H_A: \mu_i &\neq \mu_j \end{aligned} \quad (E3)$$

Para toda  $i \neq j$ . Para  $k$  tratamientos se tienen en total  $k(k-1)/2$  pares de medias. El estadístico de prueba para cada una de las hipótesis dadas en  $(i, j)$  es la correspondiente diferencia en valor absoluto entre sus medias muestrales  $|\bar{Y}_i - \bar{Y}_j|$ . Se rechaza la hipótesis  $H_0: \mu_i = \mu_j$  si ocurre que:

$$|\bar{Y}_i - \bar{Y}_j| > LSD = t_{\frac{\alpha}{2}, N-k} \sqrt{2CM_E/n}$$

Donde  $t_{\frac{\alpha}{2}, N-k}$  se lee en las tablas de la distribución T de Student con  $N - k$  grados de libertad que corresponden al error, el  $CM_E$  es el cuadrado medio del error que se obtiene de la tabla de ANOVA y  $n$  es el numero muestras (puesto que es un diseño balanceado).

En caso de rechazar  $H_0$ , se acepta la hipótesis alternativa  $H_A: \mu_i \neq \mu_j$ , la cual nos dice que las medias de los tratamientos  $i$  y  $j$  son diferentes<sup>13</sup>.

Aplicando lo anterior se obtiene que:

---

<sup>13</sup> GUTIÉRREZ PULIDO, Humberto y DE LA VARA SALAZAR, Román. Análisis y diseño de experimentos. 3 ed. México: Mc Graw Hill, 2012. 62-63p

✓ **Contenido de fibra en el bagazo desmedulado**

**Cuadro 12. Hipótesis con los posibles pares de medias para el bagazo desmedulado**

HIPOTESIS, PARES DE MEDIAS CON EL B. DESMEDULADO $k(k-1)/2$	
1	Ho : $\mu_{18} = \mu_{19}$ vs. Ha : $\mu_{18} \neq \mu_{19}$
2	Ho : $\mu_{18} = \mu_{20}$ vs. Ha : $\mu_{18} \neq \mu_{20}$
3	Ho : $\mu_{18} = \mu_{21}$ vs. Ha : $\mu_{18} \neq \mu_{21}$
4	Ho : $\mu_{19} = \mu_{20}$ vs. Ha : $\mu_{19} \neq \mu_{20}$
5	Ho : $\mu_{19} = \mu_{21}$ vs. Ha : $\mu_{19} \neq \mu_{21}$
6	Ho : $\mu_{20} = \mu_{21}$ vs. Ha : $\mu_{20} \neq \mu_{21}$

Las medias muestrales del contenido de fibra en el bagazo desmedulado que corresponden a los tratamientos en estudio son:

**Cuadro 13. Medias de contenido de fibra en el bagazo desmedulado para los tratamientos a comparar**

TRATAMIENTO	$\mu_i$
18	69.61
19	72.34
20	73.59
21	69.99

**Cuadro 14. Datos para la aplicación de la prueba LSD para el bagazo desmedulado**

N-k =	78
CME =	7.58
n =	4
$\alpha =$	5%
$t_{\alpha/2, N-K} =$	1.99
LSD =	3.8748

**Tabla 7. Aplicación de la prueba LSD al contenido de fibra en el bagazo desmedulado**

PAR DE MEDIAS	DIFERENCIA POBLACIONAL	DIFERENCIA MUESTRAL EN VALOR ABSOLUTO			DECISIÓN
1	$\mu_{18} - \mu_{19} = -2.73$	2.73	<	3.87	No significativa
2	$\mu_{18} - \mu_{20} = -3.98$	3.98	>	3.87	<b>Significativa</b>
3	$\mu_{18} - \mu_{21} = -0.38$	0.38	<	3.87	No significativa
4	$\mu_{19} - \mu_{20} = -1.25$	1.25	<	3.87	No significativa
5	$\mu_{19} - \mu_{21} = 2.35$	2.35	<	3.87	No significativa
6	$\mu_{20} - \mu_{21} = 3.60$	3.60	<	3.87	No significativa

De lo anterior se concluye que  $(\mu_{18} = \mu_{19})$ ,  $(\mu_{18} = \mu_{21})$ ,  $(\mu_{19} = \mu_{20})$ ,  $(\mu_{19} = \mu_{21})$  y  $(\mu_{20} = \mu_{21})$ , mientras que  $(\mu_{18} \neq \mu_{20})$ , es decir, según la prueba LSD se rechaza la hipótesis nula  $H_0$  (E2) para T18 -T20 y solo existe diferencia significativa entre los mismos.

✓ **Contenido de fibra en el polvillo**

**Cuadro 15. Hipótesis con los posibles pares de medias para el Polvillo**

HIPOTESIS, PARES DE MEDIAS CON EL POLVILLO $k(k-1)/2$	
1	$H_0 : \mu_{18} = \mu_{19}$ vs. $H_a : \mu_{18} \neq \mu_{19}$
2	$H_0 : \mu_{18} = \mu_{20}$ vs. $H_a : \mu_{18} \neq \mu_{20}$
3	$H_0 : \mu_{18} = \mu_{21}$ vs. $H_a : \mu_{18} \neq \mu_{21}$
4	$H_0 : \mu_{19} = \mu_{20}$ vs. $H_a : \mu_{19} \neq \mu_{20}$
5	$H_0 : \mu_{19} = \mu_{21}$ vs. $H_a : \mu_{19} \neq \mu_{21}$
6	$H_0 : \mu_{20} = \mu_{21}$ vs. $H_a : \mu_{20} \neq \mu_{21}$

Las medias muestrales del contenido de fibra en el polvillo correspondientes a los tratamientos en estudio son:

$$\mu_{18} = 21.14$$

$$\mu_{19} = 15.29$$

$$\mu_{20} = 21.72$$

$$\mu_{21} = 12.86$$

**Cuadro 16. Datos para la aplicación de la prueba LSD para el Polvillo**

N-k =	78
CME =	7.57
n =	4
$\alpha$ =	5%
$t_{\alpha/2, N-K}$ =	1.99
LSD =	3.8720

**Tabla 8. Aplicación de la prueba LSD al contenido de fibra en el Polvillo**

PAR DE MEDIAS	DIFERENCIA POBLACIONAL	DIFERENCIA MUESTRAL EN VALOR ABSOLUTO			DECISIÓN
1	$\mu_{18} - \mu_{19} = 5.85$	5.85	>	3.87	Significativa
2	$\mu_{18} - \mu_{20} = -0.58$	0.58	<	3.87	No significativa
3	$\mu_{18} - \mu_{21} = 8.28$	8.28	>	3.87	Significativa
4	$\mu_{19} - \mu_{20} = -6.43$	6.43	>	3.87	Significativa
5	$\mu_{19} - \mu_{21} = 2.43$	2.43	<	3.87	No significativa
6	$\mu_{20} - \mu_{21} = 8.85$	8.85	>	3.87	Significativa

Dado que estadísticamente ( $\mu_{18} = \mu_{20}$ ) y ( $\mu_{19} = \mu_{21}$ ) mientras que ( $\mu_{18} \neq \mu_{19}$ ), ( $\mu_{18} \neq \mu_{21}$ ), ( $\mu_{19} \neq \mu_{20}$ ) y ( $\mu_{20} \neq \mu_{21}$ ), se puede decir que según la prueba LSD se rechazan las hipótesis nulas 1, 3, 4 y 6 (Cuadro 16) y existe diferencia significativa entre los tratamientos relacionados.

En conclusión, los tratamientos que arrojaron mejores resultados son el T19 (16 cuchillas planas – 8 cuchillas ventiladoras) y el tratamiento T21 (20 cuchillas planas – 4 cuchillas ventiladoras), que estadísticamente siendo diferentes de los demás tratamientos se puede decir que son iguales entre sí en el contenido promedio de fibra en el bagazo desmedulado (ver Tabla 9) y en el contenido promedio de fibra en el polvillo (ver Tabla 10).

**7.3.2. DISEÑO FACTORIAL  $2^2$ .** Con el diseño factorial  $2^2$  se estudia el efecto de dos factores considerando dos niveles en cada uno. Cada réplica de este diseño consiste de  $2 \times 2 = 4$  combinaciones o tratamientos que se pueden denotar de diferentes maneras, como se muestra en el Cuadro 18.

La notación de Yates [(1), a, b, ab] tiene un significado diferente a las demás: con ella se representa el total o la suma de las observaciones en cada tratamiento, más que el tratamiento mismo. La lógica de la notación de Yates es la siguiente: si una letra minúscula está presente, entonces el factor correspondiente se encuentra en su nivel alto; si está ausente, el factor está en su nivel bajo; por ejemplo, ab se refiere al tratamiento en el que los factores A y B están en su nivel alto<sup>14</sup>.

<sup>14</sup> GUTIÉRREZ PULIDO, Humberto y DE LA VARA SALAZAR, Román. Análisis y diseño de experimentos. 3 ed. México: Mc Graw Hill, 2012. p150

Los factores a estudiar en el presente diseño factorial  $2^2$  son:

**La configuración de cuchillas (Factor A)**, el cual hace referencia a la cantidad y tipo de cuchillas [Ventiladoras (V), Planas (P)] dentro del equipo desmedulador para limpiar el bagazo entero proveniente del central azucarero.

**La apertura de alimentación (Factor B)**, se refiere a la proporción de apertura de las compuerta de alimentación de bagazo entero al equipo desmedulador.

Según Gutiérrez Pulido, Humberto y De la Vara, Román,

“**El efecto** se define como el cambio observado en la variable de respuesta debido a un cambio de nivel de tal factor. En particular, **los efectos principales** son los cambios en la media de la variable de respuesta que se deben a la acción individual de cada factor”<sup>15</sup>.

Con el fin de estudiar el efecto de la configuración de cuchillas y la apertura de alimentación de bagazo entero, se consideran los siguientes niveles en cada factor:

Factor A: nivel bajo, 20 cuchillas planas y 4 cuchillas ventiladoras [20P-4V], y nivel alto, 16 cuchillas planas y 8 cuchillas ventiladoras [16P-8V].

Factor B: nivel bajo, 30% de apertura de la compuerta de alimentación de bagazo entero y nivel alto, 70% de apertura de la misma.

Cuadro 17. Notaciones del Diseño Factorial  $2^2$

A: Configuración de cuchillas	B: Apertura de alimentación	A	B	A	B	NOTACIÓN DE YATES
20P-4V	30%	-	-	-1	-1	(1)
16P-8V	30%	+	-	1	-1	a
20P-4V	70%	-	+	-1	1	b
16P-8V	70%	+	+	1	1	ab

Los resultados del diseño con  $n=5$  se muestran en la Tabla No. 9.

<sup>15</sup> IBID. 117p

Tabla 9. Diseño y datos

A: Configuración de cuchillas	B: Apertura de alimentación	A	B	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	CONTENIDO DE FIBRA EN EL BAGAZO DESMEDULADO					Notación de Yates
20P-4V	30%	-	-	-1	-1	74.75	65.66	64.31	66.45	65.08	336.25 =(1)
16P-8V	30%	+	-	1	-1	68.19	62.78	69.32	68.68	69.57	338.54 =a
20P-4V	70%	-	+	-1	1	75.40	77.46	71.72	76.71	75.86	377.14 =b
16P-8V	70%	+	+	1	1	68.45	70.96	62.24	68.66	69.29	339.60 =ab
A: Configuración de cuchillas	B: Apertura de alimentación	A	B	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	CONTENIDO DE FIBRA EN EL BAGAZO POLVILLO					Notación de Yates
20P-4V	30%	-	-	-1	-1	18.56	14.60	18.80	18.76	18.41	89.13 =(1)
16P-8V	30%	+	-	1	-1	18.85	18.86	18.16	18.58	18.36	92.81 =a
20P-4V	70%	-	+	-1	1	19.69	20.41	19.11	19.44	19.53	98.18 =b
16P-8V	70%	+	+	1	1	22.52	19.47	22.00	20.41	21.32	105.72 =ab
A: Configuración de cuchillas	B: Apertura de alimentación	A	B	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	RENDIMIENTO EN REMOCIÓN DE CENIZAS					Notación de Yates
20P-4V	30%	-	-	-1	-1	57.70	89.88	37.99	43.03	48.89	277.49 =(1)
16P-8V	30%	+	-	1	-1	34.01	30.84	40.81	38.43	37.50	181.59 =a
20P-4V	70%	-	+	-1	1	84.36	55.76	30.09	40.52	53.78	264.52 =b
16P-8V	70%	+	+	1	1	94.93	59.86	33.24	56.25	51.24	295.52 =ab

De la Tabla 9. Se tiene la siguiente representación del diseño factorial:

Figura 31. Representación geométrica del diseño factorial  $2^2$  para el contenido de fibra en el bagazo desmedulado

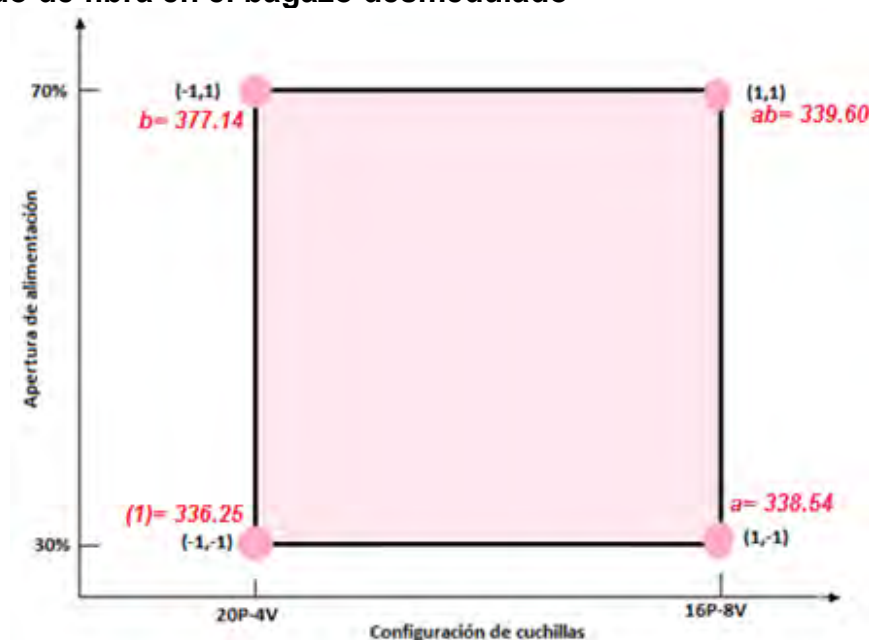


Figura 32. Representación geométrica del diseño factorial  $2^2$  para el contenido de fibra en el polvillo

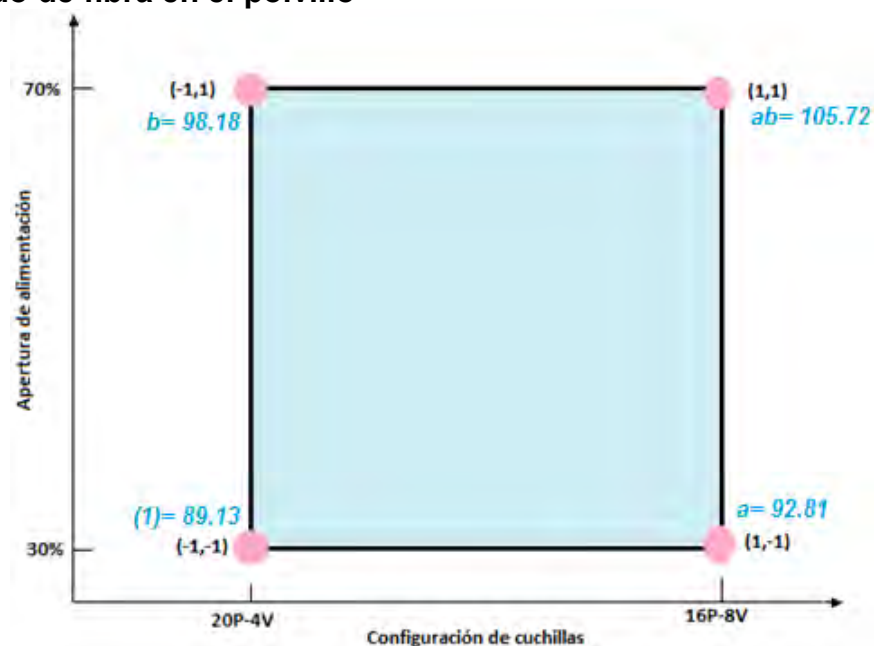
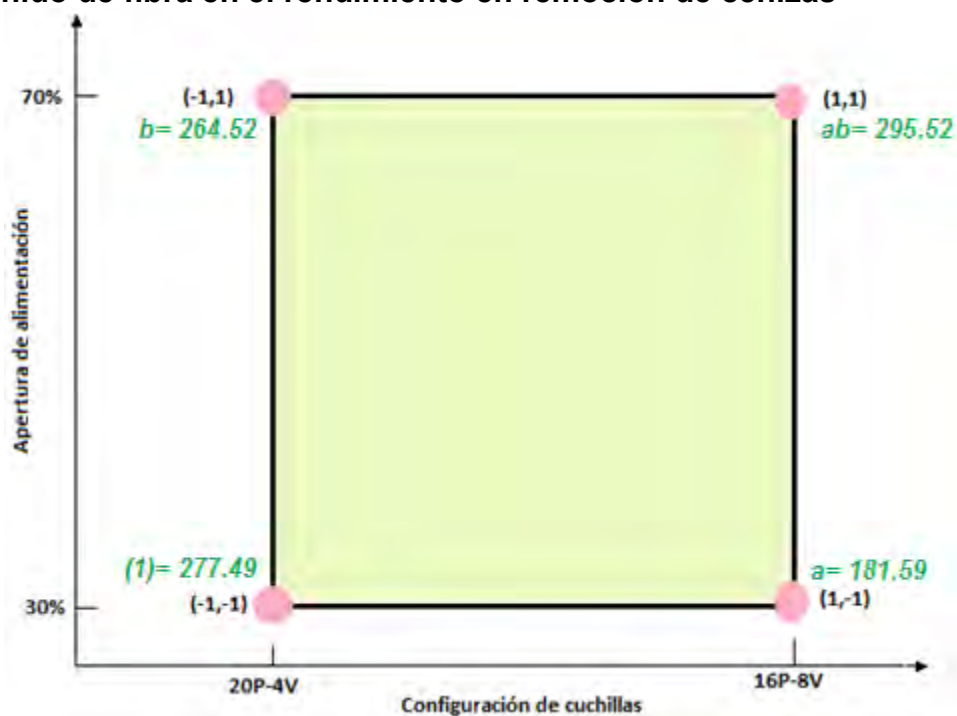


Figura 33. Representación geométrica del diseño factorial  $2^2$  para el contenido de fibra en el rendimiento en remoción de cenizas





El diseño factorial  $2^2$  se representa de manera geométrica por los vértices del cuadrado en las Figuras 31, 32 y 33 según la variable respuesta [contenido de fibra en el bagazo desmedulado, contenido de fibra en el polvillo, rendimiento en remoción de cenizas]. Cada vértice representa un punto del diseño o tratamiento. El área limitada por este cuadro (área coloreada) se conoce como **región experimental**, y en principio, las conclusiones que se obtengan del experimento sólo tienen validez sobre esta región.

En este diseño hay tres efectos de interés: los dos efectos principales (A y B) y el efecto de interacción (AB). Con el uso de la notación de Yates podemos ver que si cada tratamiento se corre  $n$  veces, entonces la media  $\bar{Y}$  en el nivel alto de A es  $(a+ab)/2n$  y en el nivel bajo es  $(b+(1))/2n$ . De aquí, y de la definición de efecto dada anteriormente, El efecto A se calcula como:

$$Efecto A = \frac{1}{2 * n} [a + ab - b - (1)] = \frac{[a + ab]}{2n} - \frac{[b + (1)]}{2n}$$

El efecto B es:

$$Efecto B = \frac{1}{2 * n} [b + ab - a - (1)] = \frac{[b + ab]}{2n} - \frac{[a + (1)]}{2n}$$

Y el efecto de interacción entre los factores A y B está dado por:

$$Efecto AB = \frac{1}{2 * n} [ab + (1) - a - b] = \frac{[ab - b]}{2n} - \frac{[a - (1)]}{2n}$$

Por tanto, con la información de la Tabla 9 y utilizando las anteriores ecuaciones, se tiene:

- Contenido de fibra en el bagazo desmedulado

$$Efecto A = \frac{1}{2 * 5} [338.54 + 339.6 - 377.14 - 336.25] = -3.53$$

$$Efecto B = \frac{1}{2 * 5} [377.14 + 339.6 - 338.54 - 336.25] = 4.20$$

$$Efecto AB = \frac{1}{2 * 5} [339.6 + 336.25 - 338.54 - 377.14] = -3.98$$

- Contenido de fibra en el polvillo

$$\text{Efecto } A = \frac{1}{2 * 5} [92.81 + 105.72 - 98.18 - 89.13] = \mathbf{1.12}$$

$$\text{Efecto } B = \frac{1}{2 * 5} [98.18 + 105.72 - 92.81 - 89.13] = \mathbf{2.20}$$

$$\text{Efecto } AB = \frac{1}{2 * 5} [105.72 + 89.13 - 92.81 - 98.18] = \mathbf{0.39}$$

- Rendimiento en remoción de cenizas

$$\text{Efecto } A = \frac{1}{2 * 5} [181.59 + 295.52 - 264.52 - 277.49] = \mathbf{-6.49}$$

$$\text{Efecto } B = \frac{1}{2 * 5} [264.52 + 295.52 - 181.59 - 277.49] = \mathbf{10.09}$$

$$\text{Efecto } AB = \frac{1}{2 * 5} [295.52 + 277.49 - 181.59 - 264.52] = \mathbf{12.69}$$

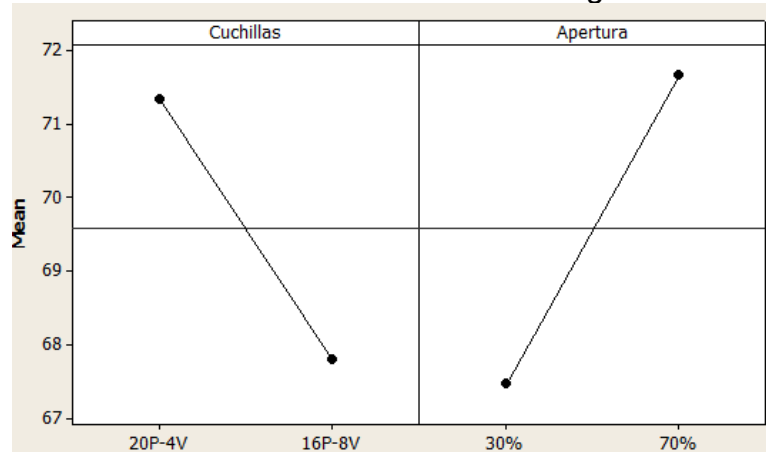
**Tabla 10. Efectos principales (A y B) y de interacción (AB)**

EFECTOS EN EL CONTENIDO DE FIBRA EN EL BAGAZO DESMEDULADO			
NOTACIÓN DE YATES	Efecto A	Efecto B	Efecto AB
(1)	-3.53	4.20	-3.98
a			
b			
ab			
EFECTOS EN EL CONTENIDO DE FIBRA EN EL POLVILLO			
NOTACIÓN DE YATES	Efecto A	Efecto B	Efecto AB
(1)	1.12	2.20	0.39
a			
b			
ab			
EFECTOS EN EL RENDIMIENTO EN REMOCIÓN DE CENIZAS			
NOTACIÓN DE YATES	Efecto A	Efecto B	Efecto AB
(1)	-6.49	10.09	12.69
a			
b			
ab			

De la Tabla No. 12 se muestra que aparentemente en términos absolutos el efecto de la apertura de alimentación de bagazo entero es mayor al efecto generado por la configuración de cuchillas para el contenido de fibra en el

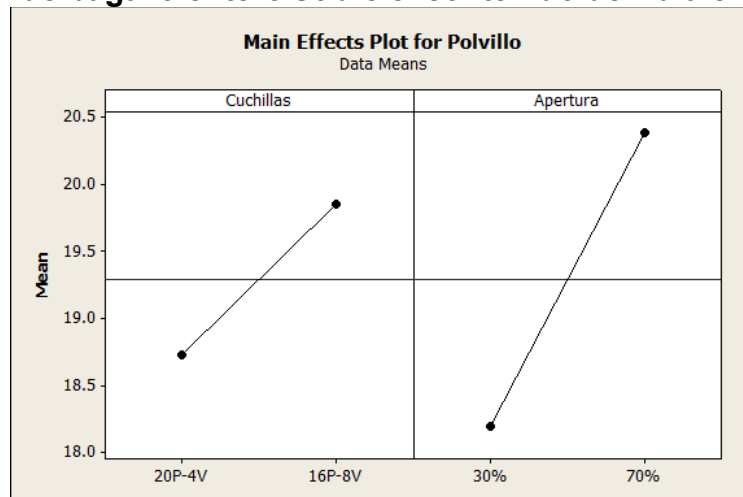
bagazo desmedulado, en el polvillo y para el rendimiento en remoción de cenizas.

Figura 34. Efectos de la configuración de cuchillas y la apertura de alimentación de bagazo entero sobre el contenido de fibra en el bagazo desmedulado.



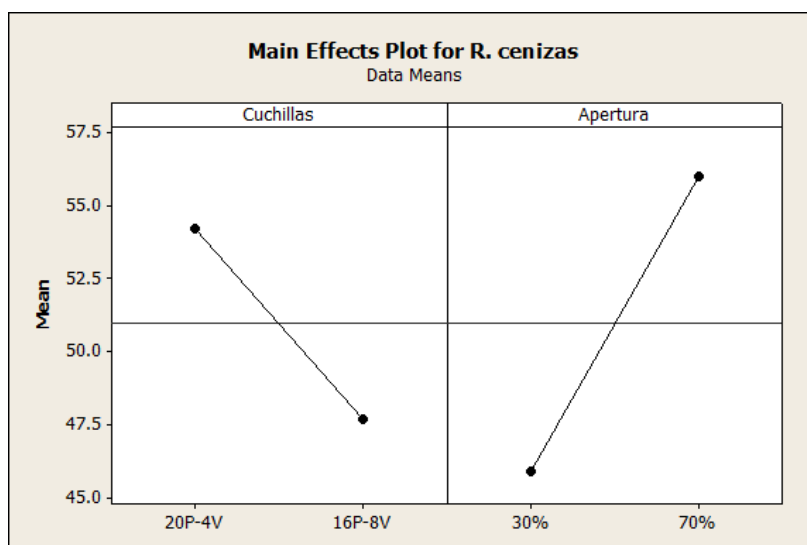
Como se muestra en la Figura 34, se obtiene mayor contenido de fibra en el bagazo desmedulado con la configuración de 20 cuchillas planas y 4 cuchillas ventiladoras y la apertura de alimentación de bagazo entero al 70%.

Figura 35. Efectos de la configuración de cuchillas y la apertura de alimentación de bagazo entero sobre el contenido de fibra en el Polvillo



Como se muestra en la Figura 35, Se minimiza el contenido de fibra en el Polvillo cuando el equipo desmedulador está configurado con 20 cuchillas planas y 4 cuchillas ventiladoras y la apertura de alimentación de bagazo entero se encuentra al 30.

**Figura 36. Efectos de la configuración de cuchillas y la apertura de alimentación de bagazo entero sobre el rendimiento en Remoción de cenizas**



Como se muestra en la Figura 36, es mayor el efecto sobre el rendimiento en remoción de cenizas con la configuración de cuchillas en nivel bajo (20 cuchillas planas y 4 cuchillas ventiladoras) y la apertura de alimentación de bagazo entero en su nivel alto (70% de apertura).

Para afirmar que los anteriores efectos contribuyen a explicar el comportamiento del contenido de fibra en el bagazo desmedulado, en el polvillo y el rendimiento en remoción de cenizas, se realiza el análisis de varianza para cada caso y para ello tenemos:

El modelo estadístico de efectos para este tipo de diseño está dado por  $Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk}$ ; para  $i = 1, 2, \dots, a$ ;  $j = 1, 2, \dots, b$ ;  $k = 1, 2, \dots, n$ ; donde  $\mu$  es la media general,  $\alpha_i$  es el efecto debido al  $i$ -ésimo nivel del factor A,  $\beta_j$  es el efecto del  $j$ -ésimo nivel del factor B,  $(\alpha\beta)_{ij}$  representa el efecto de interacción en la combinación  $ij$ , y  $\varepsilon_{ijk}$  es el error aleatorio que, se supone, sigue una distribución normal con media cero y varianza constante  $\sigma^2$  única, se introducen las restricciones  $\sum_{i=1}^a \alpha_i = 0$ ,  $\sum_{j=1}^b \beta_j = 0$  y  $\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b (\alpha\beta)_{ij} = 0$ . Es decir, los efectos dados en el modelo son desviaciones relacionadas con la media global<sup>16</sup>.

<sup>16</sup> GUTIÉRREZ PULIDO, Humberto y DE LA VARA SALAZAR, Román. Análisis y diseño de experimentos. 3 ed. México: Mc Graw Hill, 2012. p122

Las hipótesis de interés para los efectos A y B son:

$H_0$ : Efecto de la configuración de cuchillas (A) = 0

$H_A$ : Efecto de la configuración de cuchillas (A)  $\neq$  0

$H_0$ : Efecto de la apertura de alimentación de bagazo entero (B) = 0

$H_A$ : Efecto de la apertura de alimentación de bagazo entero (B)  $\neq$  0

$H_0$ : Conf. de cuchillas x Apertura de alimentación de bagazo entero (AB) = 0

$H_A$ : Conf. de cuchillas x Apertura de alimentación de bagazo entero (AB)  $\neq$  0

**Cuadro 18. ANOVA para el contenido de fibra en el bagazo desmedulado**

ANOVA - BAGAZO DESMEDULADO					
Fuente de variabilidad	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F0	Valor-p
A	62.2	1	62.17	<b>5.91</b>	<b>2.7E-02</b>
B	88.0	1	88.01	<b>8.37</b>	<b>1.1E-02</b>
AB	79.3	1	79.30	<b>7.54</b>	<b>1.4E-02</b>
ERROR	168.3	16	10.52		
Total	397.8	19			

Siendo  $F_{0.05,1,16} = 4.494$  (ver ANEXO No. 1) y dado que  $\alpha > Valor - p$  y  $F_0 < F_{0.05,1,16}$  para A, B y AB (ver Cuadro 18) se rechaza  $H_0$ , de lo cual se concluye que existe un efecto diferente de cero [0] sobre el contenido de fibra en el bagazo desmedulado, tantos por los efectos principales como el efecto de interacción.

**Cuadro 19. ANOVA para el contenido de fibra en el polvillo**

ANOVA - POLVILLO					
Fuente de variabilidad	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F0	Valor-p
A	6.3	1	6.30	<b>4.95</b>	<b>4.1E-02</b>
B	24.1	1	24.13	<b>18.96</b>	<b>4.9E-04</b>
AB	0.7	1	0.74	<b>0.58</b>	<b>4.6E-01</b>
ERROR	20.4	16	1.27		
Total	51.5	19			

Siendo  $F_{0.05,1,16} = 4.494$  (ver ANEXO No. 1), del Cuadro 19, se puede concluir que sobre el contenido de fibra en el polvillo existe al menos un efecto diferente

de cero en los efectos principales ( $\alpha > Valor - p$ ;  $F_0 > F_{0.05,1,16}$ ) y no en el efecto de interacción puesto que  $\alpha < Valor - p_{AB}$  y  $F_{0AB} < F_{0.05,1,16}$ .

**Cuadro 20. ANOVA para el rendimiento en remoción de cenizas**

ANOVA - REMOCIÓN DE CENIZAS					
Fuente de variabilidad	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F0	Valor-p
A	210.6	1	210.59	<b>0.62</b>	<b>4.4E-01</b>
B	509.5	1	509.52	<b>1.50</b>	<b>2.4E-01</b>
AB	805.3	1	805.26	<b>2.36</b>	<b>1.4E-01</b>
ERROR	5449.4	16	340.59		
Total	6974.8	19			

Siendo  $F_{0.05,1,16} = 4.494$  (ver ANEXO No. 1), del Cuadro 20, se concluye que los efectos principales y de interacción son igual a cero [0], dado que  $F_0 < F_{0.05,1,16}$  y  $\alpha < Valor - p$ .

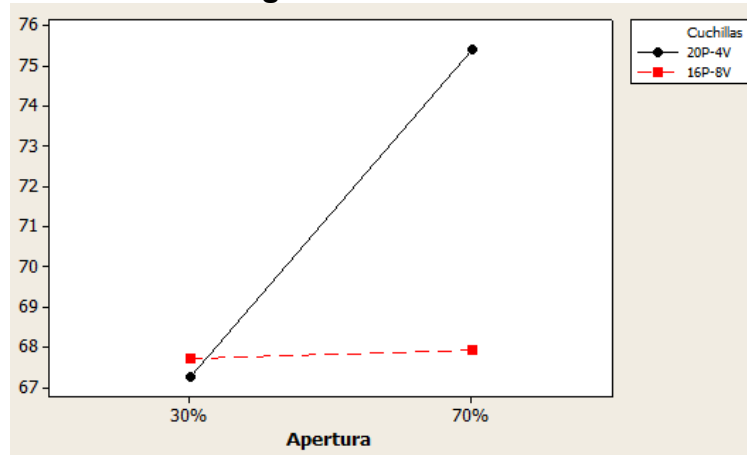
“Cuando hay interacción, las conclusiones que se obtienen a partir de los efectos principales no siempre son ciertas. En general sólo se interpretan los efectos principales de aquellos factores que no interactúan con ningún otro”.<sup>17</sup>

Con el objetivo de llegar a una mejor conclusión los efectos de interacción se analizaran a partir de las siguientes graficas:

<sup>17</sup> GUTIÉRREZ PULIDO, Op cit p157

- ✓ Efectos de interacción sobre el contenido de fibra en el bagazo desmedulado.

**Figura 37. Efecto de interacción AB sobre el contenido de fibra en el bagazo desmedulado**



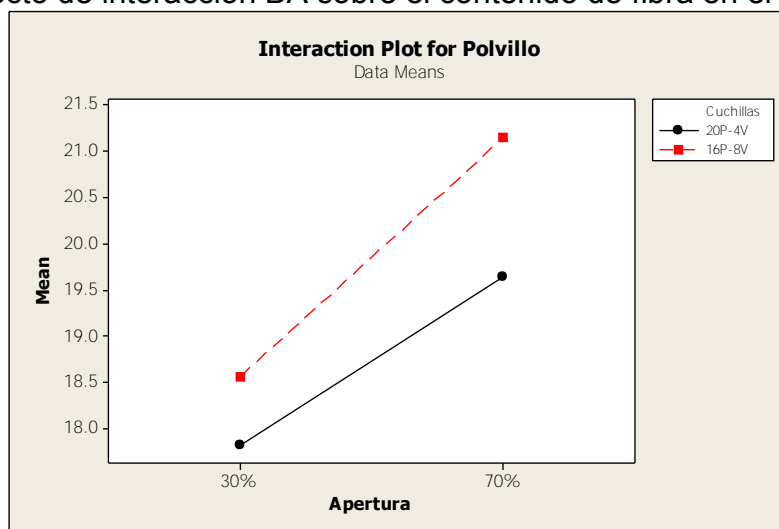
En la Figura 37, se puede observar que:

- ✓ Mientras el equipo desmedulador este configurado con 16 cuchillas planas y 8 cuchillas ventiladoras, el nivel en que se encuentre la apertura de alimentación de bagazo entero tiene un efecto no significativo sobre el contenido de fibra en el bagazo desmedulado.
- ✓ Así se encuentre la alimentación con apertura del 30% o del 70%, el contenido de fibra en el bagazo desmedulado es definitivamente muy bajo.
- ✓ Sí el equipo desmedulador está configurado con 20 cuchillas planas y 4 cuchillas ventiladoras; el porcentaje de fibra en el bagazo desmedulado se incrementa significativamente al aumentar la apertura de alimentación de bagazo entero.

En conclusión, la mejor condición para maximizar el contenido de fibra en el bagazo desmedulado se da con la configuración de 20 cuchillas planas y 4 cuchillas ventiladoras, siempre y cuando la alimentación se encuentre al 70% de apertura.

✓ **Efectos de interacción sobre el contenido de fibra en el Polvillo.**

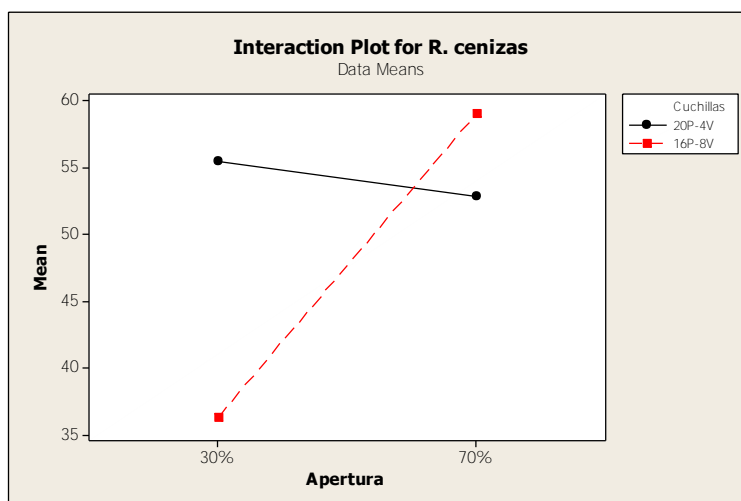
Figura 38. Efecto de interacción BA sobre el contenido de fibra en el Polvillo



De la Figura 38, se puede concluir que no hay interacción entre la configuración de cuchillas con la apertura de alimentación de bagazo entero.

✓ **Efectos de interacción sobre el rendimiento en remoción de cenizas**

Figura 39. Efecto de interacción BA sobre el rendimiento en remoción de cenizas



En la Figura 39, se observa que:

✓ Si se cambia el nivel de la apertura de alimentación de bagazo entero de 30% a 70%, cuando la configuración de cuchillas es 20 cuchillas planas y 4 cuchillas ventiladoras el rendimiento en remoción de cenizas disminuye; pero si



la configuración de cuchillas es 16 cuchillas planas y 8 ventiladoras, el rendimiento en remoción de cenizas se incrementa.

✓ Para maximizar el rendimiento en remoción de cenizas se debe configurar el equipo con desmedulador con 20 cuchillas planas y 4 ventiladoras siempre y cuando se mantenga la apertura de alimentación de bagazo entero en 30%; y con 16 cuchillas planas y 8 ventiladoras siempre y cuando la apertura este en 70%.

En conclusión, para maximizar el contenido de fibra en el bagazo desmedulado es necesario configurar el equipo desmedulador con 20 cuchillas planas y 4 cuchillas ventiladoras y la apertura de alimentación al 70% (ver Figura 37). El contenido de fibra en el polvillo no se minimiza pero se obtiene un porcentaje ajustable a las políticas de la organización. No obstante, los valores obtenidos con 20 cuchillas planas y 4 ventiladoras se encuentran por debajo de los respectivos con 16 cuchillas planas y 8 cuchillas ventiladoras (ver Figura 38).

**7.3.2.1. Comparación de Medias.** Las hipótesis para comparar las medias del factor A (Configuración de cuchillas) son:

$$\begin{aligned}H_0: \mu_{A1} &= \mu_{A2} \\ H_A: \mu_{A1} &\neq \mu_{A2}\end{aligned}$$

Mientras que para el factor B (apertura de alimentación de bagazo entero) se tienen las siguientes hipótesis:

$$\begin{aligned}H_0: \mu_{B1} &= \mu_{B2} \\ H_A: \mu_{B1} &\neq \mu_{B2}\end{aligned}$$

✓ Prueba LSD para el contenido de fibra en el bagazo desmedulado.

**Cuadro 21. . Datos del experimento factorial para el contenido de fibra en el bagazo desmedulado**

		B: APERTURA DE ALIMENTACIÓN DE BAGAZO ENTERO				
		1: 30%		2: 70%		Total $Y_{i.}$
A: CONF. DE CUCHILLAS	1: 20P-4V	74.8	336.3	75.4	377.1	713.4
		65.7		77.5		
		64.3		71.7		
		66.5		76.7		
		65.1		75.9		
	2: 16P-8V	68.2	338.5	68.5	339.6	678.1
		62.8		71.0		
		69.3		62.2		
		68.7		68.7		
		69.6		69.3		
	Total $Y_{.i}$	674.8		716.7		$Y_{..}= 1391.5$

Debido a que el efecto de interacción de la configuración de cuchillas y la apertura de alimentación de bagazo entero sobre el contenido de fibra en el bagazo desmedulado es significativo, las comparaciones de medias se realizan de manera separada en cada nivel del otro factor. De esta manera se tiene:

$$\bar{Y}_{1,1} = \frac{336.3}{5} = 67.26; \bar{Y}_{1,2} = \frac{377.1}{5} = 75.42; \bar{Y}_{2,1} = \frac{338.5}{5} = 67.7 \text{ y } \bar{Y}_{2,2} = \frac{339.6}{5} = 67.92$$

Por lo tanto la diferencia mínima significativa está dada por:

$$LSD_{A_i(B)} = t_{\alpha/2, ab(n-1)} \sqrt{CM_E \left( \frac{1}{n} + \frac{1}{n} \right)}$$

$$LSD_{B_i(A)} = t_{\alpha/2, ab(n-1)} \sqrt{CM_E \left( \frac{1}{n} + \frac{1}{n} \right)}$$

De lo cual se obtiene,

$$LSD_{A_i(B)} = 2.12 * \sqrt{\left[ 10.52 * \left( \frac{1}{5} + \frac{1}{5} \right) \right]} = 4.348$$

$$LSD_{B_i(A)} = 2.12 * \sqrt{\left[10.52 * \left(\frac{1}{5} + \frac{1}{5}\right)\right]} = 4.348$$

Al comparar la diferencia de las medias con  $LSD_{A_i(B)}$  y  $LSD_{B_i(A)}$  resulta lo siguiente:

$$|\bar{Y}_{A_1(B_1)} - \bar{Y}_{A_1(B_2)}| = |67.26 - 75.42| = 8.16 > LSD_{A_1(B)}$$

$$|\bar{Y}_{A_2(B_1)} - \bar{Y}_{A_2(B_2)}| = |67.7 - 67.92| = 0.22 < LSD_{B_2(A)}$$

Y

$$|\bar{Y}_{B_1(A_1)} - \bar{Y}_{B_1(A_2)}| = |67.26 - 67.7| = 0.44 < LSD_{B_1(A)}$$

$$|\bar{Y}_{B_2(A_1)} - \bar{Y}_{B_2(A_2)}| = |75.42 - 67.92| = 7.5 > LSD_{B_2(A)}$$

De lo anterior se concluye que:

✓ Solo hay diferencia significativa entre  $A_1$  y  $A_2$  cuando el factor  $B = B_2$ , es decir, existe diferencia significativa entre las configuraciones de cuchillas [20P-4V, 16P-8V] únicamente cuando la apertura de alimentación de bagazo entero está al 70%.

✓ Hay diferencia significativa entre  $B_1 = B_2$  cuando el factor  $A = A_1$ , es decir, existe diferencia entre los niveles de apertura de alimentación [30%, 70%] mientras el equipo desmedulador se encuentre configurado con 20 cuchillas planas y 4 cuchillas ventiladoras.

**7.3.2.2. Verificación de Supuestos.** Los supuestos del modelo de análisis de varianza deben verificarse antes de dar por válidas las conclusiones del análisis. La tabla de ANOVA supone que los residuos se distribuyen normales, independientes y con varianzas constantes. La violación grave de cualquier de estos supuestos conduce a conclusiones erróneas.

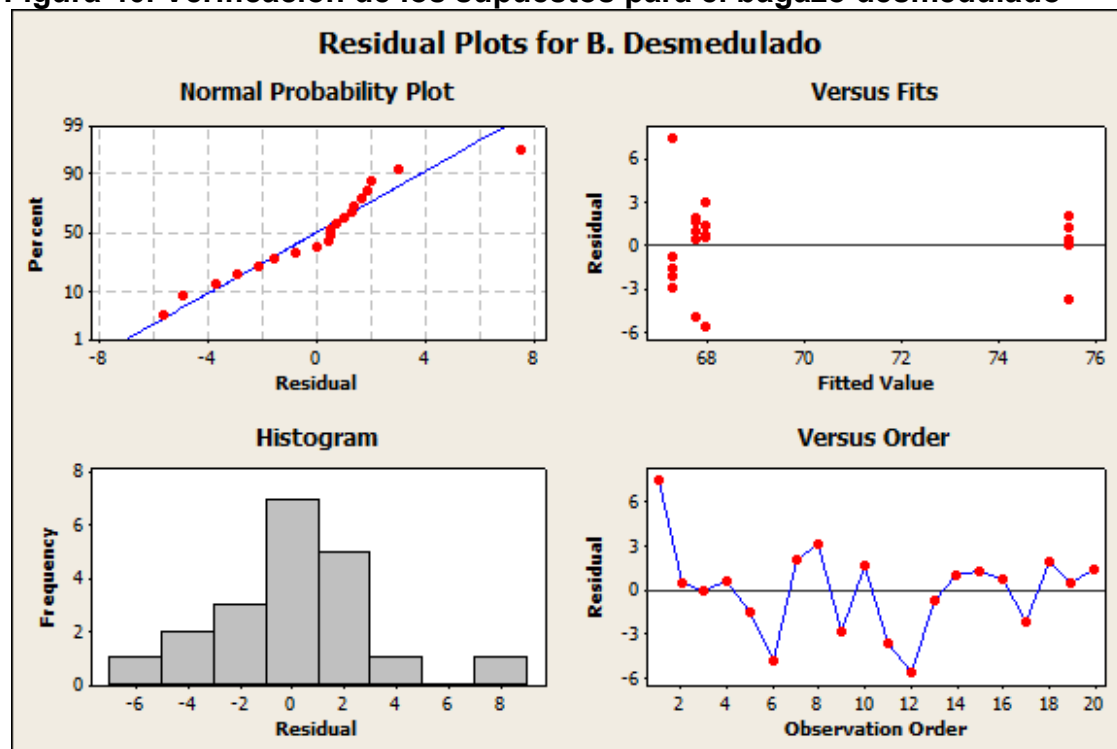
El supuesto de varianza constante se puede verificar graficando los residuos contra los predichos, y los puntos deben caer aleatoriamente en el sentido vertical dentro de una banda horizontal para concluir que el supuesto se

cumple. Los huecos en el sentido horizontal se deben a que sólo son cuatro puntos de diseño, y las predicciones en ellos difieren bastante<sup>18</sup>.

El supuesto de normalidad se verifica en los gráficos de probabilidad normal, observando que los puntos del diseño se encuentran a lo largo de la línea recta, y en el histograma verificando que se construya en el mismo la llamada campana de Gauss.

Para probar el supuesto de independencia se requiere capturar los datos en el orden en el que fueron obtenidos, a fin de que el software pueda graficar los residuos con respecto al tiempo u orden de corrida. Al no observar ninguna tendencia de los puntos, se concluye que no existe problema con la declaración de independencia<sup>19</sup>.

**Figura 40. Verificación de los supuestos para el bagazo desmedulado**



<sup>18</sup> GUTIÉRREZ PULIDO, Humberto y DE LA VARA SALAZAR, Román. Análisis y diseño de experimentos. 3 ed. México: Mc Graw Hill, 2012. 162p

<sup>19</sup> GUTIÉRREZ PULIDO, Op cit . p63

Figura 41. Verificación de los supuestos para el Polvillo

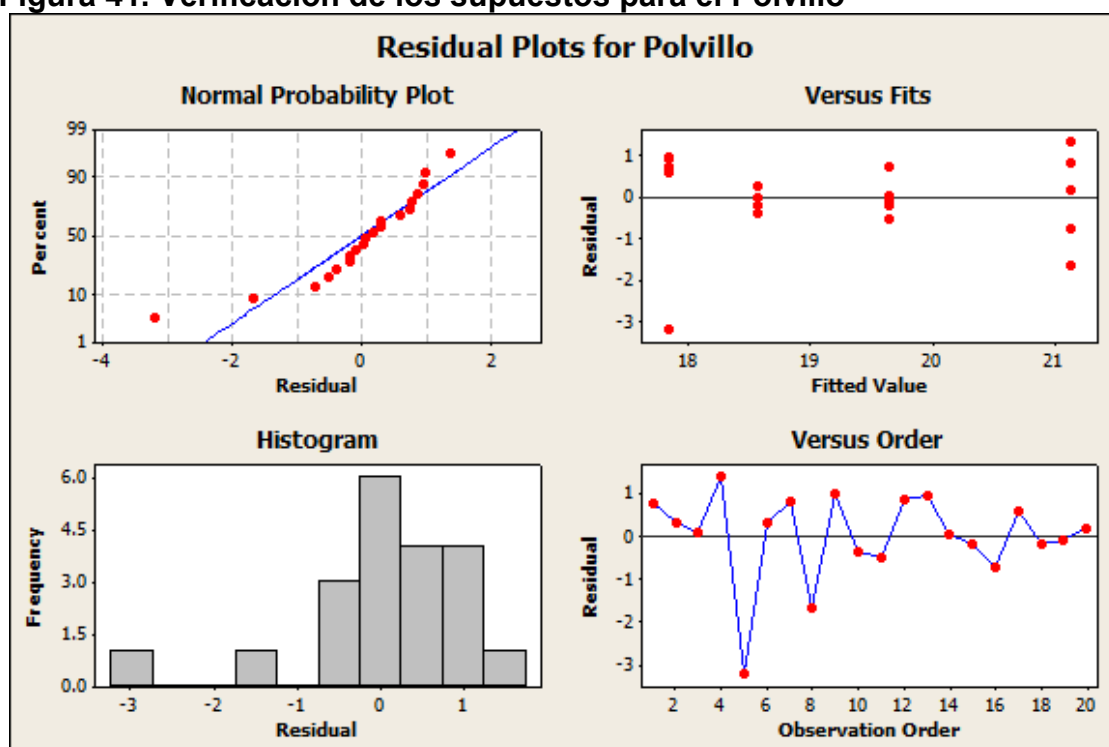
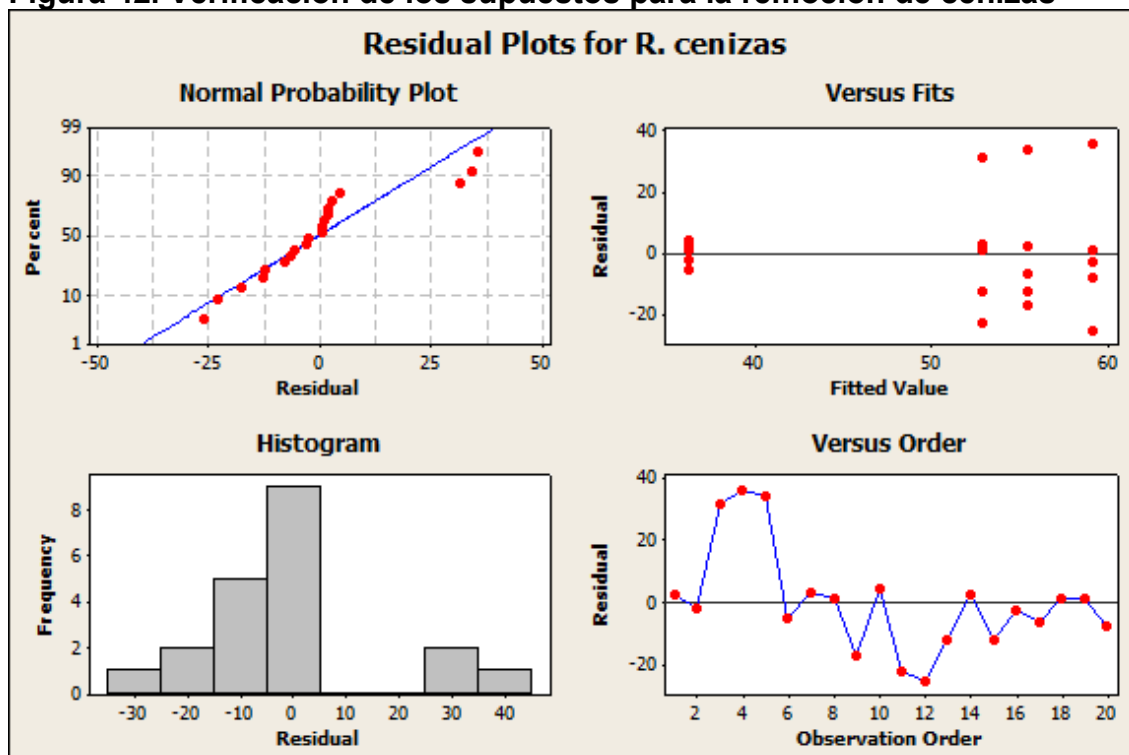
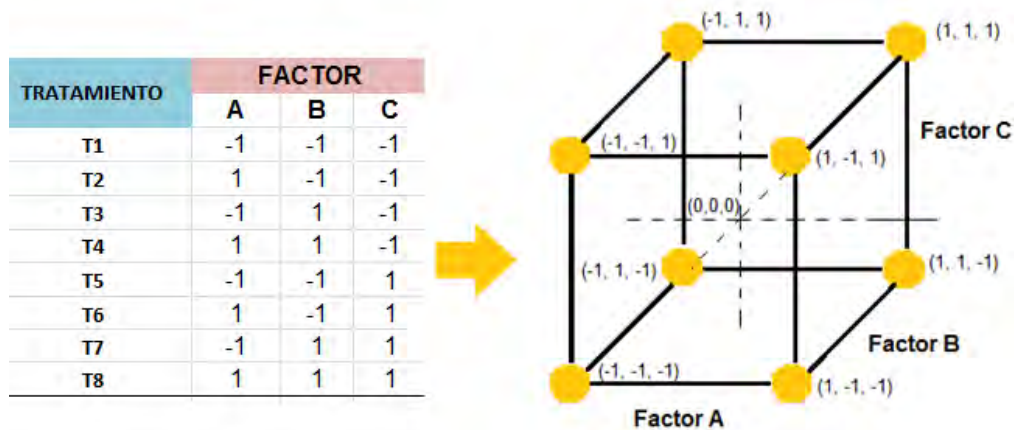


Figura 42. Verificación de los supuestos para la remoción de cenizas



**7.3.3. Diseño factorial con tres factores.** Con el diseño factorial  $2^3$  se estudia el efecto de tres factores en dos niveles cada uno. Consta de  $2^3 = 2 * 2 * 2 = 8$  tratamientos diferentes, los cuales se identifican con notaciones similares a las del diseño factorial  $2^2$  (ver Cuadro 16). Los tratamientos del diseño  $2^3$  y su representación geométrica se muestran en el Gráfico 24. La región experimental ahora es un cubo regular centrado en el origen (0, 0, 0), cuyos vértices son los ocho tratamientos. La matriz de diseño se construye fácilmente alternando el signo menos y el signo más en la primera columna, dos menos y dos más en la segunda columna, y cuatro menos y cuatro más en la tercera columna; el diseño resulta acomodado en el orden estándar o de Yates.

**Figura 43. Matriz de diseño factorial  $2^3$  y su representación geométrica**



Con este diseño se pueden estudiar  $2^3 - 1 = 7$  efectos: tres efectos principales A, B, C; tres interacciones dobles AB, AC, BC, y una interacción triple ABC<sup>20</sup>.

Los efectos de este diseño se pueden calcular a partir de la tabla de signos, donde las columnas de los efectos principales A, B y C son las mismas que en la matriz de diseño (Figura 43), y las columnas de los efectos de interacción se obtienen multiplicando las columnas correspondientes.

Al multiplicar las columnas de signos de la Tabla 11 por la columna de totales representados por la notación de Yates, se obtienen los contrastes para los siete efectos, dados por:

$$\text{Contraste A} = [a + ab + ac + abc - (1) - b - c - bc]$$

<sup>20</sup> GUTIÉRREZ PULIDO, Humberto y DE LA VARA SALAZAR, Román. Análisis y diseño de experimentos. 3 ed. México: Mc Graw Hill, 2012. 163p

$$\text{Contraste } B = [b + ab + bc + abc - (1) - a - c - ac]$$

$$\text{Contraste } C = [c + ac + bc + abc - (1) - a - b - ab]$$

$$\text{Contraste } AB = [ab - b - a + abc + (1) - bc - ac + c]$$

$$\text{Contraste } AC = [(1) - a + b - ab - c + ac - bc + abc]$$

$$\text{Contraste } BC = [(1) + a - b - ab - c - ac + bc + abc]$$

$$\text{Contraste } ABC = [abc - bc - ac + c - ab + b + a - (1)]$$

Tabla 11. Tabla de signos del diseño factorial 2x3

Total	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
(1)	-	-	-	+	+	+	-
a	+	-	-	-	-	+	+
b	-	+	-	-	+	-	+
ab	+	+	-	+	-	-	-
c	-	-	+	+	-	-	+
ac	+	-	+	-	+	-	-
bc	-	+	+	-	-	+	-
abc	+	+	+	+	+	+	+

Fuente: GUTIÉRREZ PULIDO, Humberto y DE LA VARA SALAZAR, Román. Análisis y diseño de experimentos. 3 ed. México: Mc Graw Hill, 2012. p164

Según Gutiérrez y De la Vara,

“Los efectos de un diseño factorial  $2^3$  y la suma de cuadrados de los mismos se calculan a partir de sus contrastes con las formulas:

$$Efecto_{efecto} = \frac{Contraste_{efecto}}{n * 2^{k-1}}$$

Y

$$SC_{efecto} = \frac{(Contraste_{efecto})^2}{n * 2^k}$$

La suma total de cuadrados se obtiene de la manera usual como:

$$SC_T = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{l=1}^2 \sum_{m=1}^n y_{ijlm}^2 - \frac{Y_{...}^2}{n2^k} \quad ^{21}.$$

Cuando se quiere investigar la influencia de tres factores (A, B y C) sobre una o más variables de respuesta, y el número de niveles de prueba en cada uno de los factores es a, b y c, respectivamente, se puede construir un arreglo factorial a x b x c, que consiste de a x b x c tratamientos o puntos experimentales. Entre arreglos de este tipo que se utilizan con frecuencia en aplicaciones diversas, se encuentran: el factorial  $2^3$ , el factorial  $3^3$  y los factoriales mixtos con no más de cuatro niveles en dos de los factores, por ejemplo, el factorial 4 x 3 x 2 y el factorial 4 x 4 x 2, por mencionar dos de ellos.<sup>22</sup>

Se quiere determinar la combinación de la apertura de alimentación de bagazo entero (factor A), la configuración de cuchillas (factor B), y la dimensión de los agujeros de la criba (factor C), que maximicen el contenido de fibra en el bagazo desmedulado [ $Y_1$ ] y minimicen el contenido de fibra en el polvillo [ $Y_2$ ]. Para ello se realizará un experimento factorial 3 x 2 x 2 con 10 réplicas.

Los niveles de prueba para cada factor son:

**Factor A:**

- Alimentación al 25% de apertura [25%]
- Alimentación al 50% de apertura [50%]
- Alimentación al 75% de apertura [75%]

**Factor B:**

- 16 cuchillas planas y 8 cuchillas ventiladoras [16P-8V]
- 20 cuchillas planas y 4 cuchillas ventiladoras [20P-4V]

**Factor C:**

- Agujeros de 5/16 de pulgada [5/16"]
- Agujeros de 3/8 de pulgada [3/8"]

---

<sup>21</sup> GUTIÉRREZ PULIDO, Humberto y DE LA VARA SALAZAR, Román. Análisis y diseño de experimentos. 3 ed. México: Mc Graw Hill, 2012. 164p

<sup>22</sup> IBID. 128p



El arreglo factorial es:

Cuadro 22. Matriz del diseño factorial en unidades originales

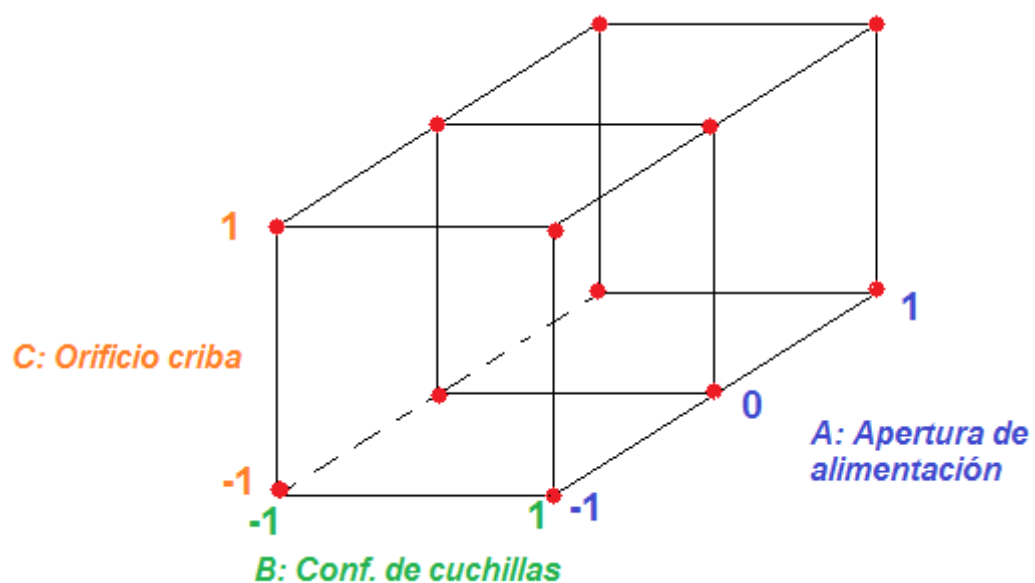
FACTOR	Niveles		
	Bajo	Medio	Alto
A: Apertura de alimentación	25%	50%	75%
B: Conf. de cuchillas	16P-8V		20P-4V
C: Orificio criba	5/16		3/8

Cuadro 23 Matriz de diseño en unidades codificadas

MATRIZ DE DISEÑO			
FACTOR	Niveles Codificados		
	Bajo	Medio	Alto
A	-1	0	1
B	-1		1
C	-1		1

La representación geométrica del experimento se muestra en el siguiente:

Figura 44. Representación geométrica del diseño factorial 3 x 2 x 2



El diseño factorial de tres factores permite investigar los efectos: A, B, C, AB, AC, BC y ABC, donde el nivel de desglose o detalle con el que pueden estudiarse depende del número de niveles utilizado en cada factor. Por ejemplo, si un factor se prueba con dos niveles, todo su efecto marginal (individual) es lineal, o sea que su efecto principal no se puede descomponer; pero, si tuviera tres niveles, su efecto marginal se puede descomponer en una parte lineal y otra cuadrática pura.

De esta manera, se tiene siete efectos de interés sin considerar desglose, y con ellos se pueden plantear las siete hipótesis nulas  $H_0: \text{Efecto A} = 0$ ,  $H_0: \text{Efecto B} = 0$ , ...,  $H_0: \text{Efecto ABC} = 0$ , cada una aparejada con su correspondiente hipótesis alternativa. EL ANOVA para probar estas hipótesis se muestra en la siguiente tabla:

**Tabla 12. ANOVA para el diseño factorial a x b x c**

FV	SC	GL	CM	F0	Valor-p
Efecto A	SC <sub>A</sub>	a-1	CM <sub>A</sub>	CM <sub>A</sub> / CM <sub>E</sub>	$P(F > F_0^A)$
Efecto B	SC <sub>B</sub>	b-1	CM <sub>B</sub>	CM <sub>B</sub> / CM <sub>E</sub>	$P(F > F_0^B)$
Efecto C	SC <sub>C</sub>	c-1	CM <sub>C</sub>	CM <sub>C</sub> / CM <sub>E</sub>	$P(F > F_0^C)$
Efecto AB	SC <sub>AB</sub>	(a-1)(b-1)	CM <sub>AB</sub>	CM <sub>AB</sub> / CM <sub>E</sub>	$P(F > F_0^{AB})$
Efecto AC	SC <sub>AC</sub>	(a-1)(c-1)	CM <sub>AC</sub>	CM <sub>AC</sub> / CM <sub>E</sub>	$P(F > F_0^{AC})$
Efecto BC	SC <sub>BC</sub>	(b-1)(c-1)	CM <sub>BC</sub>	CM <sub>BC</sub> / CM <sub>E</sub>	$P(F > F_0^{BC})$
Efecto ABC	SC <sub>ABC</sub>	(a-1)(b-1)(c-1)	CM <sub>ABC</sub>	CM <sub>ABC</sub> / CM <sub>E</sub>	$P(F > F_0^{ABC})$
Error	SC <sub>E</sub>	abc(n-1)	CM <sub>E</sub>		
Total	SC <sub>T</sub>	abcn-1			

**Fuente:** GUTIÉRREZ PULIDO, Humberto y DE LA VARA SALAZAR, Román. Análisis y diseño de experimentos. 3 ed. México: Mc Graw Hill, 2012. 130p

Al efecto cuyo valor-p sea menor que el valor especificado para alfa ( $\alpha=0.05$ ), se declara estadísticamente significativo o se dice que está activo. Las sumas de cuadrados son muy similares a las obtenidas para dos factores; habrá que considerar un subíndice adicional para el tercer factor, y comenzando por la suma total de cuadrados, éstas resultan ser:

$$SC_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \sum_{l=1}^n Y_{ijkl}^2 - \frac{Y_{\dots}^2}{N}$$

Donde  $N = abcn$  es el total de observaciones en el experimento. Las sumas de cuadrados de efectos son:

$$SC_A = \sum_{i=1}^a \frac{Y_{i...}^2}{bcn} - \frac{Y_{...}^2}{N}$$

$$SC_B = \sum_{j=1}^b \frac{Y_{.j..}^2}{acn} - \frac{Y_{...}^2}{N}$$

$$SC_C = \sum_{k=1}^c \frac{Y_{..k.}^2}{abn} - \frac{Y_{...}^2}{N}$$

$$SC_{AB} = \sum_{i=1}^a \sum_{l=1}^b \frac{Y_{il..}^2}{cn} - \frac{Y_{...}^2}{N} - SC_A - SC_B$$

$$SC_{AC} = \sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^c \frac{Y_{i.k.}^2}{bn} - \frac{Y_{...}^2}{N} - SC_A - SC_C$$

$$SC_{BC} = \sum_{l=1}^b \sum_{k=1}^c \frac{Y_{.lk.}^2}{an} - \frac{Y_{...}^2}{N} - SC_B - SC_C$$

$$SC_{ABC} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \frac{Y_{ijk.}^2}{n} - \frac{Y_{...}^2}{N} - SC_{AB} - SC_{AC} - SC_{BC}$$

Al restar éstas del total, la suma de cuadrados del error resulta ser:

$$SC_E = SC_T - SC_A - SC_B - SC_C - SC_{AB} - SC_{AC} - SC_{BC} - SC_{ABC}$$

Cuyos respectivos grados de libertad se dan en la Tabla 12, una vez hecho el ANOVA, se procede a interpretar los efectos activos y a diagnosticar los supuestos del modelo<sup>23</sup>.

Se corrieron 10 réplicas del diseño para las cuales obtenemos:

---

<sup>23</sup> GUTIÉRREZ PULIDO, Humberto y DE LA VARA SALAZAR, Román. Análisis y diseño de experimentos. 3 ed. México: Mc Graw Hill, 2012. 130-131p

**Cuadro 24. Resultado del contenido de fibra en el bagazo desmedulado – Diseño factorial 3 x 2 x 2 [%]**

		C1					C2				
A1	B1	71.54	66.67	70.11	68.65	65.32	71.35	71.67	68.58	68.48	65.21
	B2	69.1	70.48	66.39	64.86	70.35	73.65	75.62	70.29	71.78	72.68
A2	B1	71.4	68.48	68.57	73.9	65.99	72.49	72.09	63.79	65.86	70.2
	B2	69.86	66.6	67.69	69.22	72.73	73.64	74.53	75.16	72.4	73.63
A3	B1	68.76	67.36	69.65	68.1	68.98	67.38	69.7	69.64	70.28	71.08
	B2	67.84	67.81	66.34	69.13	70.11	73.65	68.12	67.47	69.25	70.02
A3	B1	64.87	65.29	66.82	69.36	68.73	68.74	69.28	67.83	70.66	69.63
	B2	65.37	66.28	64.32	66.28	66.28	67.27	69.63	67.22	69.09	68.29
A3	B1	69.85	66.93	68.95	70.71	70.07	67.95	69.37	65.08	74.87	76.39
	B2	65.55	71.1	71.87	69.99	68.12	72.32	73.34	71.1	72.68	67.95
A3	B1	66.39	64.86	76.35	67.2	67.17	76.28	70.11	73.61	71.54	73.67
	B2	75.35	76.29	74.76	77.18	76.94	69.81	74.65	70.32	72.1	72.48

**Cuadro 25. Resultados del contenido de fibra en el Polvillo – Diseño factorial 3 x 2 x 2 [%]**

		C1					C2				
A1	B1	20.37	23.93	22.84	21.89	18.54	30.42	27.86	27.15	34.73	26.6
	B2	25.35	19.4	20.69	21.65	19.14	31.15	31.24	30.65	29.06	30.43
A2	B1	17.34	15.38	22.53	17.31	21.46	29.55	31.69	23.11	24.8	31.4
	B2	16.83	17.13	20.92	18.37	17.61	38.67	21.58	23.64	30	31.33
A2	B1	22.65	26.1	25.89	20.87	22.67	32.26	30.98	29.34	29.99	27.33
	B2	26.45	19.67	22.39	21.95	24.44	31.66	34.79	30.65	31.28	28.98
A3	B1	30.26	29.34	28.89	31.67	28.98	35.54	33.98	32.98	34.66	36.02
	B2	27.99	28.35	27.98	32.78	27.41	33.72	32.89	31.77	33.55	34.2
A3	B1	22.09	22.53	23.87	22.75	21.3	28.96	34.95	30.52	32.11	29.73
	B2	23.1	20.7	21.17	24.49	23.14	36.77	36.82	31.75	28.18	28.44
A3	B1	19.98	18.19	17.31	19.71	22.35	31.11	29.29	29.26	30.2	28
	B2	21.69	13.42	19.53	18.7	22.65	31.25	31.59	27.83	28.95	31.21

Del Cuadro 24, se obtiene:

- **SUMA TOTAL DE CUADRADOS PARA EL CONTENIDO DE FIBRA EN EL BAGAZO DESMEDULADO**

$$SC_T = 582564 - \frac{69187294.05}{3*2*2*10} = 6003.02^{24}$$

<sup>24</sup> Valores obtenidos en la herramienta Excel con las funciones  
 =SUMA.CUADRADOS(número1,[número2],...) y  
 =(SUMA(número1,[número2],...))^2

Del Cuadro 25, resulta:

- **SUMA TOTAL DE CUADRADOS PARA EL CONTENIDO DE FIBRA EN EL POLVILLO**

$$SC_T = 88699 - \frac{10192886.32}{3*2*2*10} = 3758.30^{25}$$

Se realiza la suma de las réplicas en cada experimento, a partir de estos se calculan los totales marginales y las sumas de cuadrados, de lo cual tenemos:

- ✓ **Contenido de fibra en el bagazo desmedulado**

**Cuadro 26. Suma de resultados del contenido de fibra en el bagazo desmedulado.**

A X B X C		C1	C2
A1	B1	683.47	709.31
	B2	694.44	713.79
A2	B1	684.08	696.59
	B2	597.32	687.64
A3	B1	693.14	711.05
	B2	722.49	724.57

<sup>25</sup> Valores obtenidos en la herramienta Excel con las funciones  
 =SUMA.CUADRADOS(número1,[número2],...) y  
 =(SUMA(número1,[número2],...))^2

**Cuadro 27. Cálculo de los totales marginales del contenido de fibra en el bagazo desmedulado**

A X B X C		C1	C2	Ai
A1	B1	683.47	709.31	2801.01
	B2	694.44	713.79	
A2	B1	684.08	696.59	2665.63
	B2	597.32	687.64	
A3	B1	693.14	711.05	2851.25
	B2	722.49	724.57	

A X B	B1	B2
A1	1392.78	1408.23
A2	1380.67	1284.96
A3	1404.19	1447.06
Bi	4177.64	4140.25

A X C	C1	C2
A1	1377.91	1423.1
A2	1281.4	1384.23
A3	1415.63	1435.62
Ci	4074.94	4242.95

B X C	C1	C2
B1	2060.69	2116.95
B2	2014.25	2126

- SUMA DE CUADRADOS

$$SC_A = \frac{(2801.01^2 + 2665.63^2 + 2851.25^2)}{2 * 2 * 10} - 576560.78 = \mathbf{460.89}$$

$$SC_B = \frac{(4177.64^2 + 4140.25^2)}{3 * 2 * 10} - 576560.78 = \mathbf{11.65}$$

$$SC_C = \frac{(4074.94^2 + 4242.95^2)}{3 * 2 * 10} - 576560.78 = \mathbf{235.23}$$

$$SC_{AB} = \frac{(1392.78^2 + 1408.23^2 + 1380.67^2 + 1284.96^2 + 1404.19^2 + 1447.06^2)}{2 * 10} - 576560.78 - 460.89 - 11.65 = \mathbf{269.27}$$

$$SC_{AC} = \frac{(1377.91^2 + 1423.1^2 + 1281.4^2 + 1384.23^2 + 1415.63^2 + 1435.62^2)}{2 * 10} - 576560.78 - 460.89 - 235.23 = \mathbf{90.17}$$

$$SC_{BC} = \frac{(2060.69^2 + 2116.95^2 + 2014.25^2 + 2126^2)}{3 * 10} - 576560.78 - 11.65 - 235.23 = \mathbf{25.66}$$

$$SC_{ABC} = \frac{(683.47^2 + 709.31^2 + 694.44^2 + 713.79^2 + 684.08^2 + 696.59^2 + 597.32^2 + 687.64^2 + 693.14^2 + 711.05^2 + 722.49^2 + 724.57^2)}{10} - 576560.78 - 460.89 - 11.65 - 235.23 - 269.27 - 90.17 - 25.66 = \mathbf{133.02}$$

✓ **Contenido de fibra en el Polvillo**

**Cuadro 28. Suma de resultados del contenido de fibra en el polvillo**

A X B X C		C1	C2
A1	B1	213.8	299.29
	B2	184.88	285.77
A2	B1	233.08	307.26
	B2	293.65	339.31
A3	B1	225.14	318.23
	B2	193.53	298.69

**Cuadro 29. Cálculo de los totales marginales para el contenido de fibra en el polvillo**

A X B X C		C1	C2	Ai
A1	B1	213.8	299.29	983.74
	B2	184.88	285.77	
A2	B1	233.08	307.26	1173.3
	B2	293.65	339.31	
A3	B1	225.14	318.23	1035.59
	B2	193.53	298.69	

A X B	B1	B2
A1	513.09	470.65
A2	540.34	632.96
A3	543.37	492.22
Bi	1596.8	1595.83

A X C	C1	C2
A1	398.68	585.06
A2	526.73	646.57
A3	418.67	616.92
Ci	1344.08	1848.55

B X C	C1	C2
B1	672.02	924.78
B2	672.06	923.77

- SUMA DE CUADRADOS

$$SC_A = \frac{(983.74^2 + 1173.3^2 + 1035.59^2)}{2 * 2 * 10} - 84940.72 = 479.88$$

$$SC_B = \frac{(1596.8^2 + 1595.83^2)}{3 * 2 * 10} - 84940.72 = 0.01$$

$$SC_C = \frac{(1344.08^2 + 1848.55^2)}{3 * 2 * 10} - 84940.72 = 2120.75$$

$$SC_{AB} = \frac{(513.09^2 + 470.65^2 + 540.34^2 + 632.96^2 + 543.37^2 + 492.22^2)}{2 * 10} - 84940.72 - 479.88 - 0.01 = 324.89$$



$$SC_{AC} = \frac{(398.68^2 + 585.06^2 + 526.73^2 + 646.57^2 + 418.67^2 + 616.92^2)}{2 * 10} - 84940.72 - 479.88 - 2120.75 = \mathbf{89.30}$$

$$SC_{BC} = \frac{(672.02^2 + 924.78^2 + 672.06^2 + 923.77^2)}{3 * 10} - 84940.72 - 0.01 - 2120.75 = \mathbf{0.01}$$

$$SC_{ABC} = \frac{(213.8^2 + 299.29^2 + 184.88^2 + 285.77^2 + 233.08^2 + 307.26^2 + 293.65^2 + 339.31^2 + 225.14^2 + 318.23^2 + 193.53^2 + 298.69^2)}{10} - 84940.72 - 479.88 - 0.01 - 2120.75 - 324.89 - 89.30 - 0.01 = \mathbf{29.90}$$

El ANOVA para probar estas hipótesis en el contenido de fibra en el bagazo desmedulado y el contenido de fibra en el polvillo se muestran en las siguientes tablas:

✓ BAGAZO DESMEDULADO

**Cuadro 30. ANOVA para el contenido de fibra en el bagazo desmedulado**

ANOVA - DESMEDULADO					
FUENTE DE VARIABILIDAD	SUMA DE CUADRADOS	GRADOS DE LIBERTAD	CUADRADO MEDIO	F <sub>0</sub>	Valo-p
Efecto A	460.89	2	230.44	34.88	0.0000
Efecto B	11.65	1	11.65	1.76	0.1870
Efecto C	235.23	1	235.23	35.60	0.0000
Efecto AB	269.27	2	134.64	20.38	0.0000
Efecto AC	90.17	2	45.08	6.82	0.0016
Efecto BC	25.66	1	25.66	3.88	0.0513
Efecto ABC	133.02	2	66.51	10.07	0.0001
Error	4777.14	108	44.23		
Total	6003.02	119			

Del Cuadro 30, se concluye que los efectos a interpretar son el A, C, AB, AC y ABC puesto que es el que se encuentran activos (su Valor -p < α), mientras que los efectos B y BC no influyen, dado que su **Valor-p** mayor que α=0.05.

Por lo tanto tenemos:

**Cuadro 31. ANOVA simplificado para el contenido de fibra en el bagazo desmedulado**

ANOVA SIMPLIFICADO					
FUENTE DE VARIABILIDAD	SUMA DE CUADRADOS	GRADOS DE LIBERTAD	CUADRADO MEDIO	F <sub>0</sub>	Valo-p
Efecto A	460.89	2	230.44	5.23	0.00678
Efecto B	11.65	1	11.65	0.26	0.60815
Efecto C	235.23	1	235.23	5.34	0.02274
Efecto AB	269.27	2	134.64	3.06	0.05115
Efecto AC	90.17	2	45.08	1.02	0.36288
Efecto ABC	25.66	2	12.83	0.29	0.74797
Error	4802.80	109	44.06		
Total	6003.02	119			

Del F<sub>0</sub> del Cuadro 31, se observa que el efecto más importante es el de C, seguido por A, la interacción AB, la interacción AC y por último la interacción ABC.

✓ POLVILLO

**Cuadro 32. ANOVA para el contenido de fibra en el polvillo**

ANOVA - POLVILLO					
FUENTE DE VARIABILIDAD	SUMA DE CUADRADOS	GRADOS DE LIBERTAD	CUADRADO MEDIO	F <sub>0</sub>	Valo-p
Efecto A	479.88	2	239.94	36.32	0.0000
Efecto B	0.01	1	0.01	0.00	0.9726
Efecto C	2120.75	1	2120.75	320.98	0.0000
Efecto AB	324.89	2	162.45	24.59	0.0000
Efecto AC	89.30	2	44.65	6.76	0.0017
Efecto BC	0.01	1	0.01	0.00	0.9703
Efecto ABC	29.90	2	14.95	2.26	0.1090
Error	713.56	108	6.61		
Total	3758.30	119			

Del Cuadro 32, se concluye que los efectos a interpretar son el A, C, AB y AC puesto que es el que se encuentran activos (su Valor -p <  $\alpha$ ), mientras que los efectos B, BC, y ABC no influyen, dado que su **Valor-p** mayor que  $\alpha=0.05$ .

Por lo tanto tenemos,

**Cuadro 33. ANOVA simplificado para el contenido de fibra en el polvillo**

ANOVA SIMPLIFICADO					
FUENTE DE VARIABILIDAD	SUMA DE CUADRADOS	GRADOS DE LIBERTAD	CUADRADO MEDIO	F <sub>0</sub>	Valo- <i>p</i>
Efecto A	479.88	2	239.94	35.82	9.909E-13
Efecto B	0.01	1	0.01	0.00	9.728E-01
Efecto C	2120.75	1	2120.75	316.63	2.712E-34
Efecto AB	324.89	2	162.45	24.25	1.825E-09
Efecto AC	89.30	2	44.65	6.67	1.844E-03
Error	743.46	111	6.70		
Total	3758.30	119			

Del F<sub>0</sub> del Cuadro 33, se aprecia que el efecto más importante es el de C, seguido por A, la interacción AB y la interacción AC, respectivamente.

Prácticamente toda la información relevante del experimento se aprecia en su representación gráfica (Figura 45, 46, 47 y 48).

**Figura 45. Efectos principales para el contenido de fibra en el bagazo desmedulado**

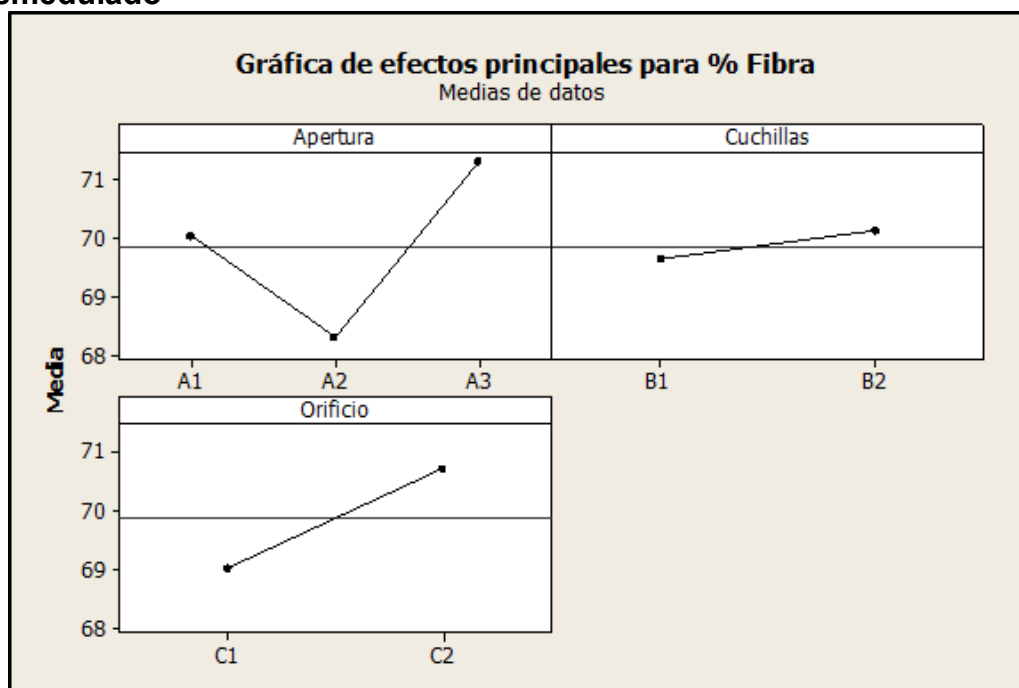


Figura 46. Efectos principales para el contenido de fibra en el polvillo

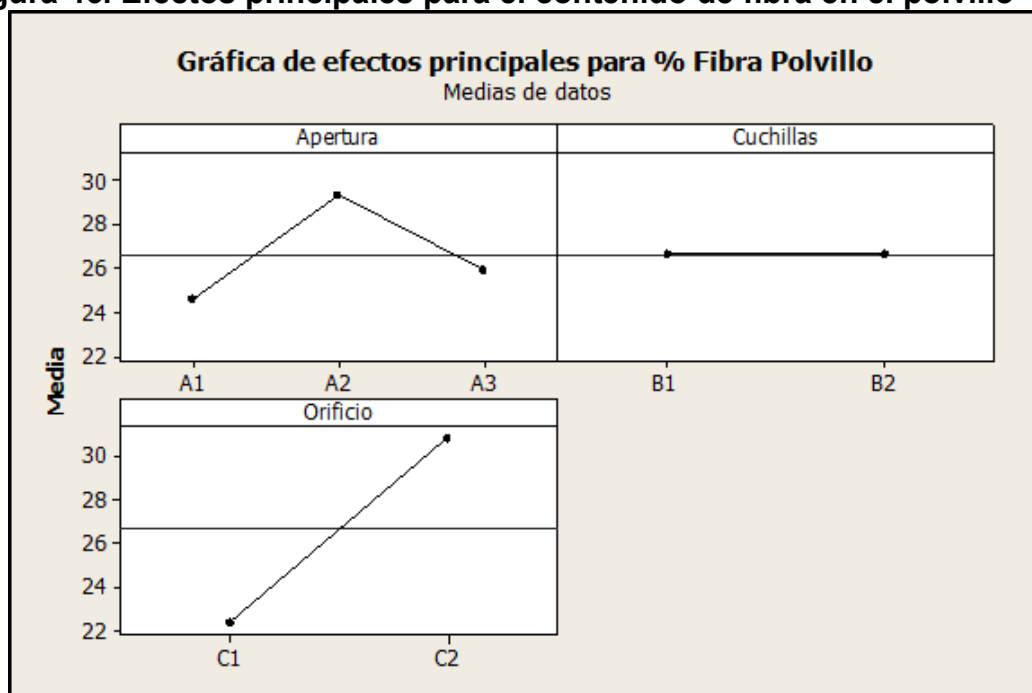
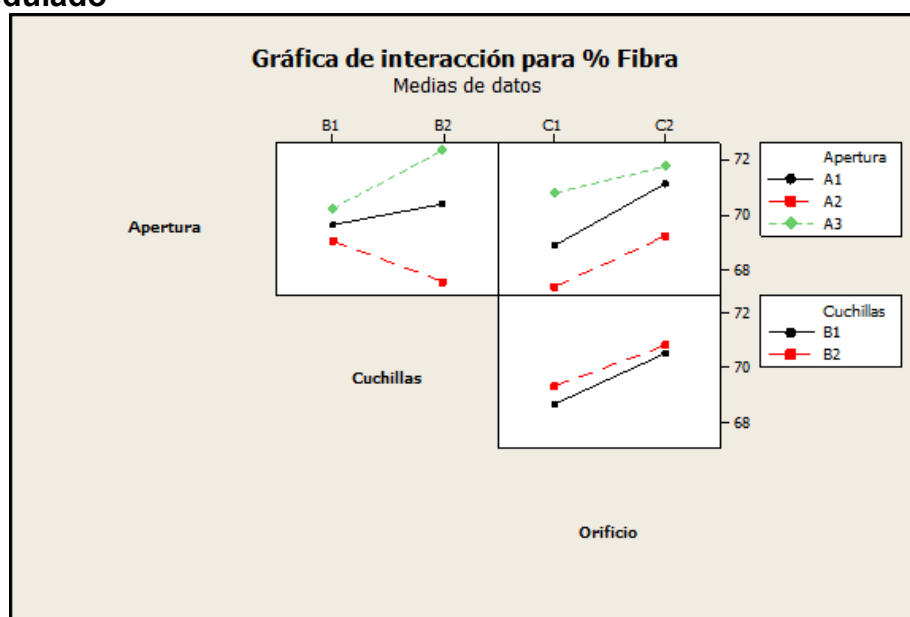
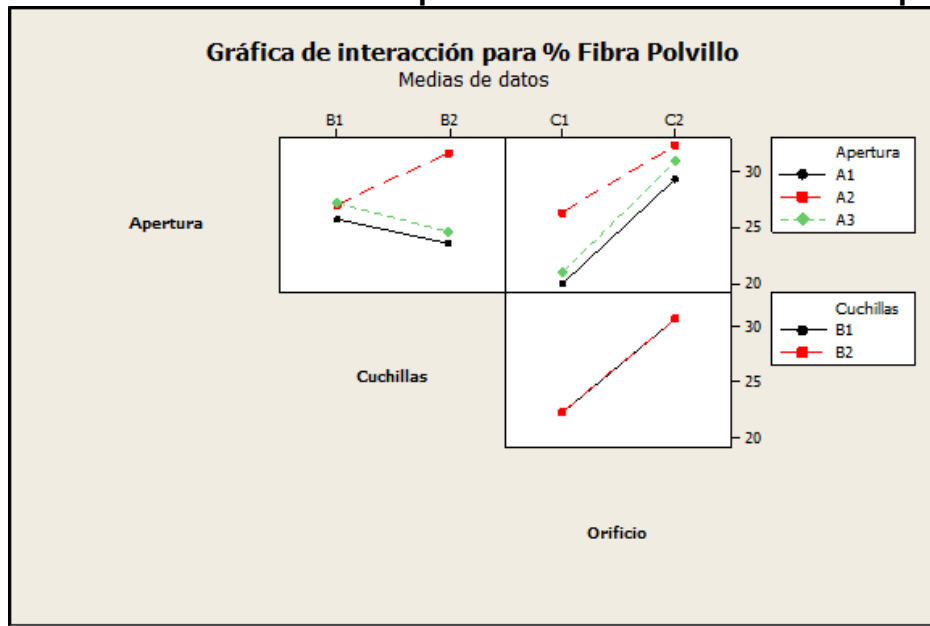


Figura 47. Efectos de interacción para el contenido de fibra en el bagazo desmedulado

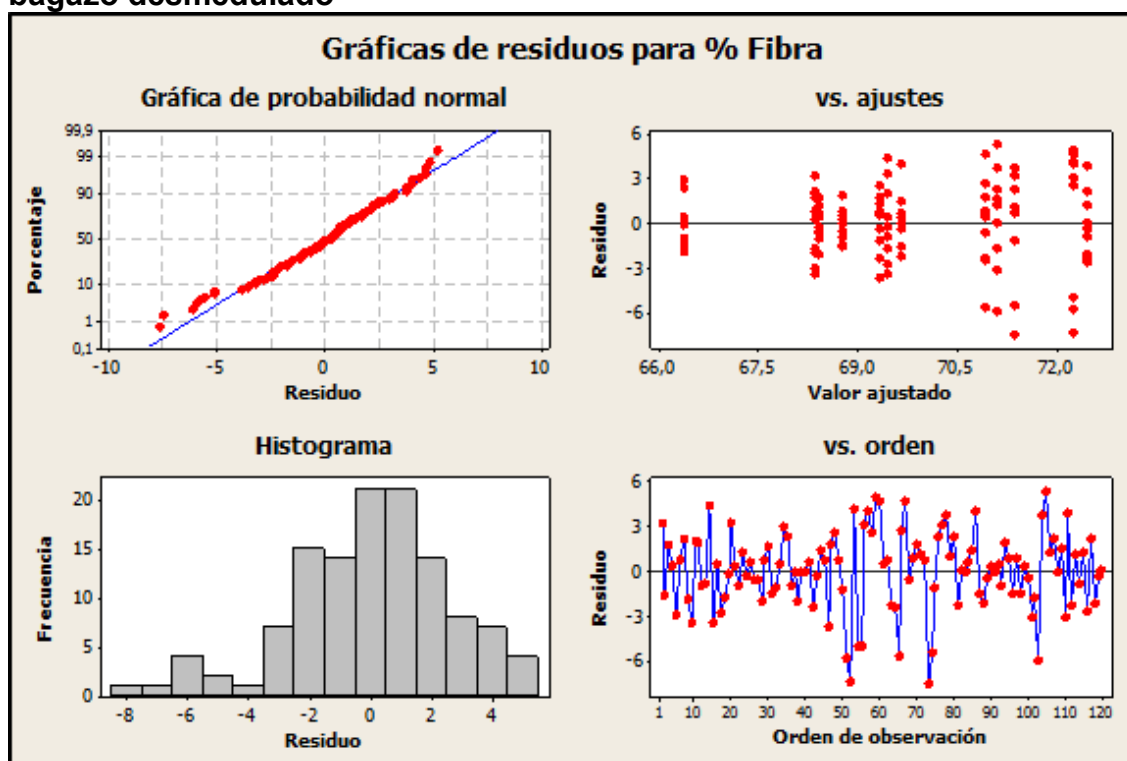


**Figura 48. Efectos de interacción para el contenido de fibra en el polvillo**

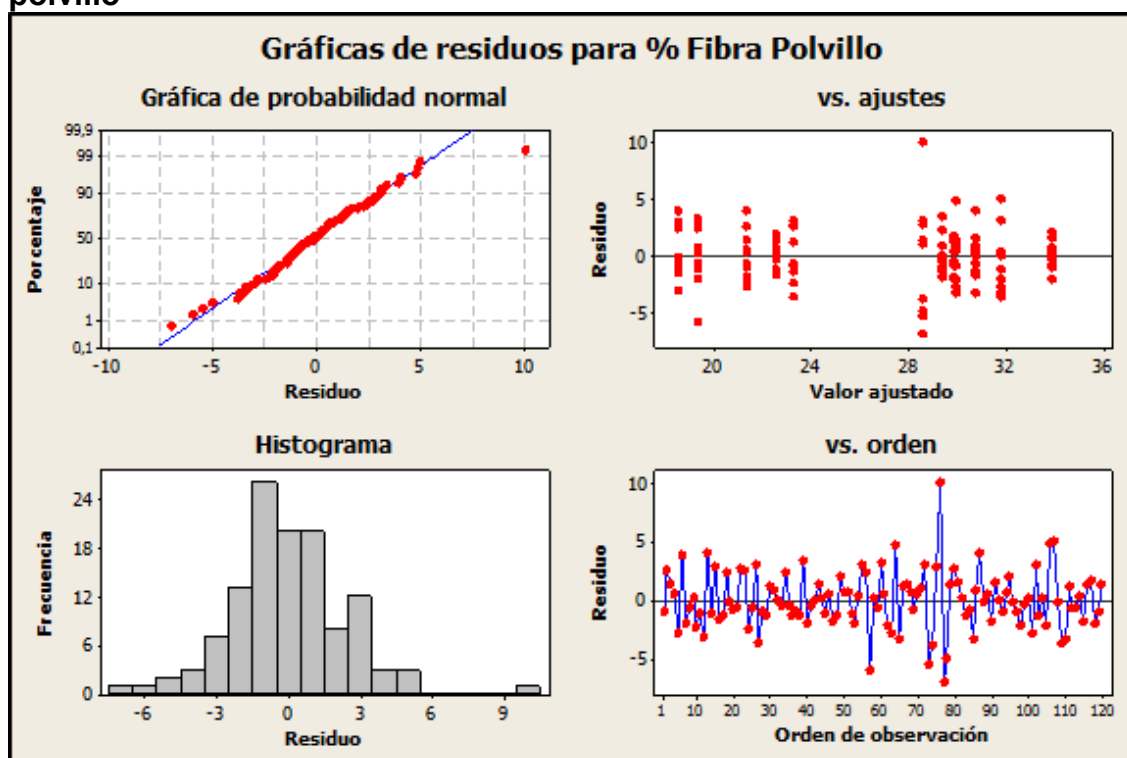


Nótese en la Figuras 47 y 48 que aparecen tantas líneas como niveles tenga el factor que se dibuja, es decir, para la Apertura de alimentación (A) en sentido horizontal interacciona con la configuración de cuchillas (B) y seguido su interacción con el Orificio de los agujeros de la criba (C) se muestran 3 líneas en cada gráfico, y en la interacción de la Configuración de cuchillas (B) con el Orificio de los agujeros de la criba (C) se observa 2 líneas.

**Figura 49. Verificación de los supuestos para el contenido de fibra en el bagazo desmedulado**



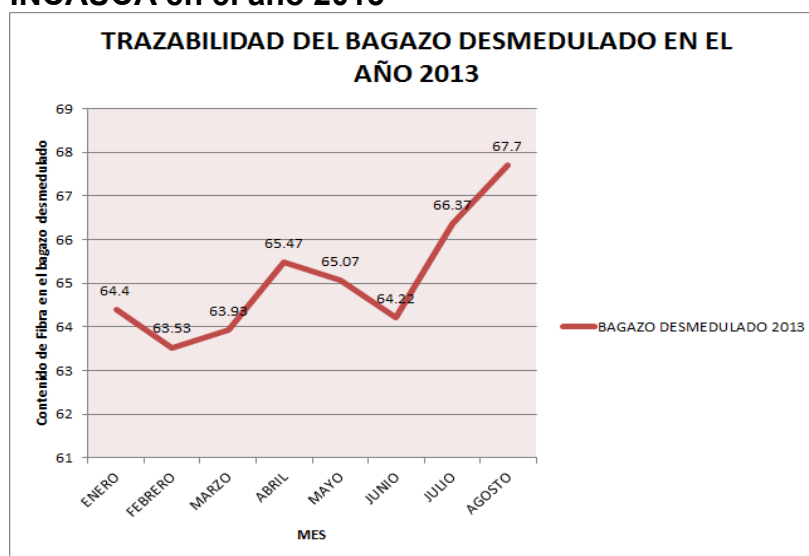
**Figura 50. Verificación de los supuestos para el contenido de fibra en el polvillo**



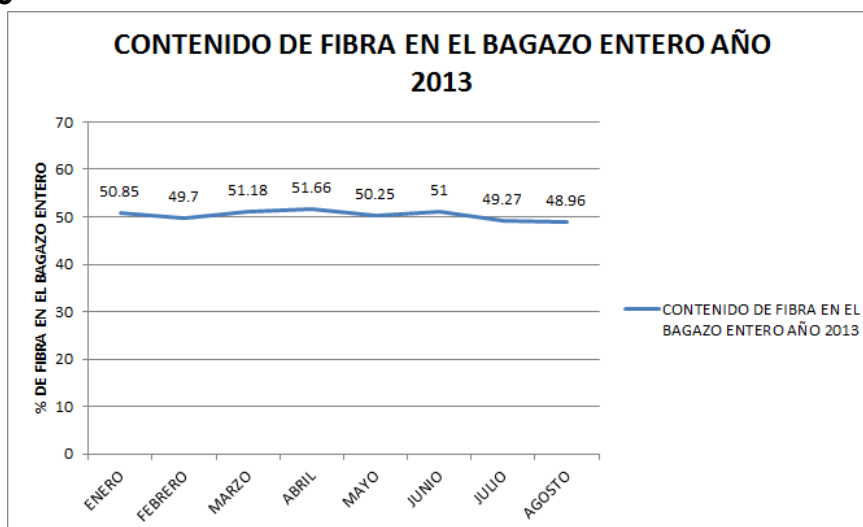
- **Resultados obtenidos**

Una vez estudiada la trazabilidad del contenido promedio de fibra en el bagazo desmedulado del año 2013 (Figura 51), se evidencia un aumento en la calidad de fibra obtenida en el mes de Agosto, mejoramiento que se atribuye a la modificación de la disposición de elementos en los equipos desmeduladores, teniendo en cuenta que el comportamiento de la fibra del bagazo entero no mostró cambios significativos (Figura 52) y no hubo más cambios en la planta.

**Figura 51. Trazabilidad del Bagazo desmedulado proveniente del central azucarero INCAUCA en el año 2013**

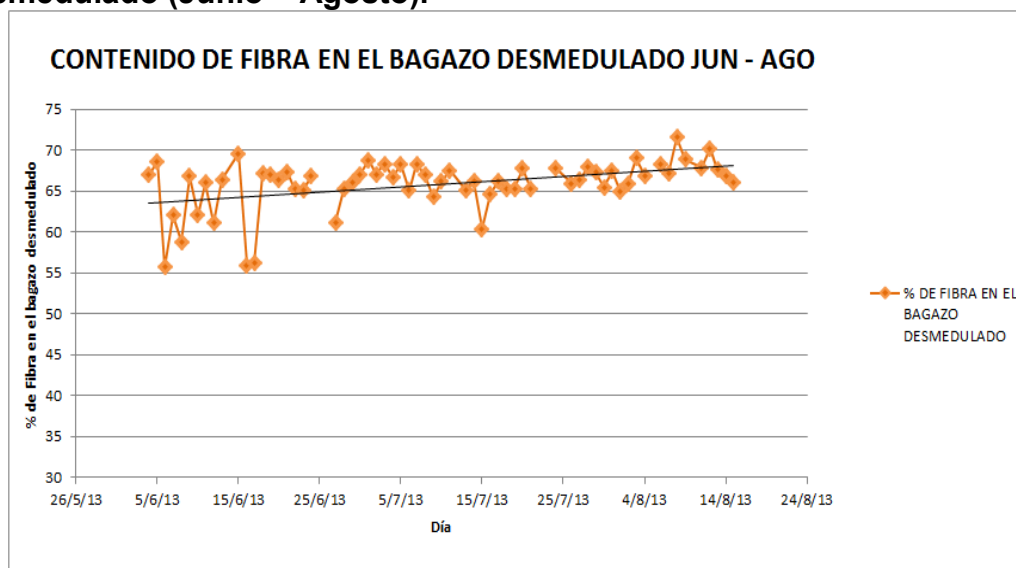


**Figura 52. Trazabilidad del contenido de Fibra en el bagazo entero en el año 2013**

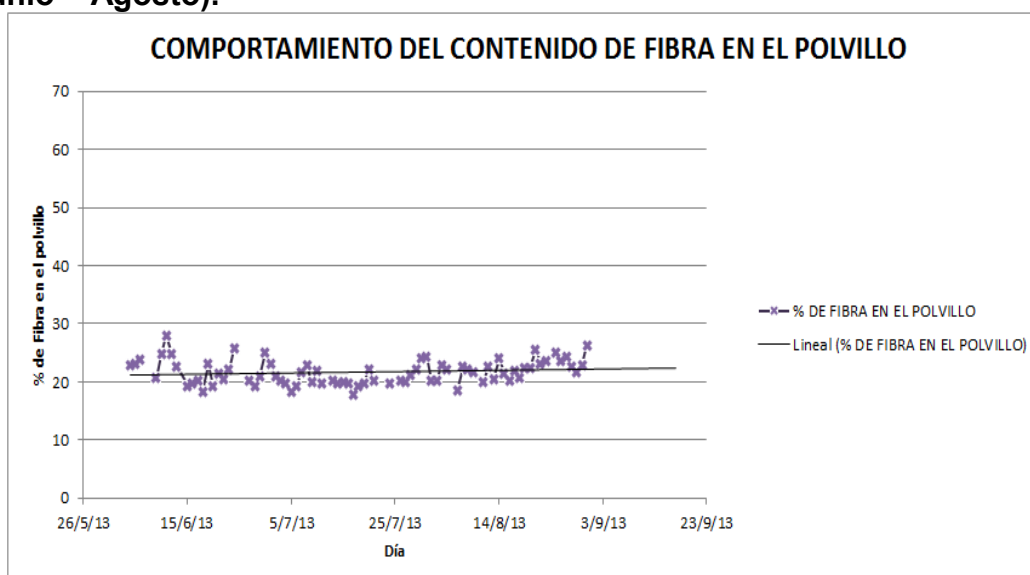


Para efectos de un análisis más detallado se toman los datos diarios de los meses de Junio, Julio y Agosto de 2013 en los Figura 53, 54, 55, y 56, en los cuales se registran los comportamiento del contenido de fibra en el bagazo desmedulado, el contenido de fibra en el bagazo polvillo, el consumo energético en la planta de desmedulado, y el comportamiento del rechazo de polvillo al central azucarero, respectivamente.

**Figura 53. Comportamiento y tendencia de la fibra en el bagazo desmedulado (Junio – Agosto).**

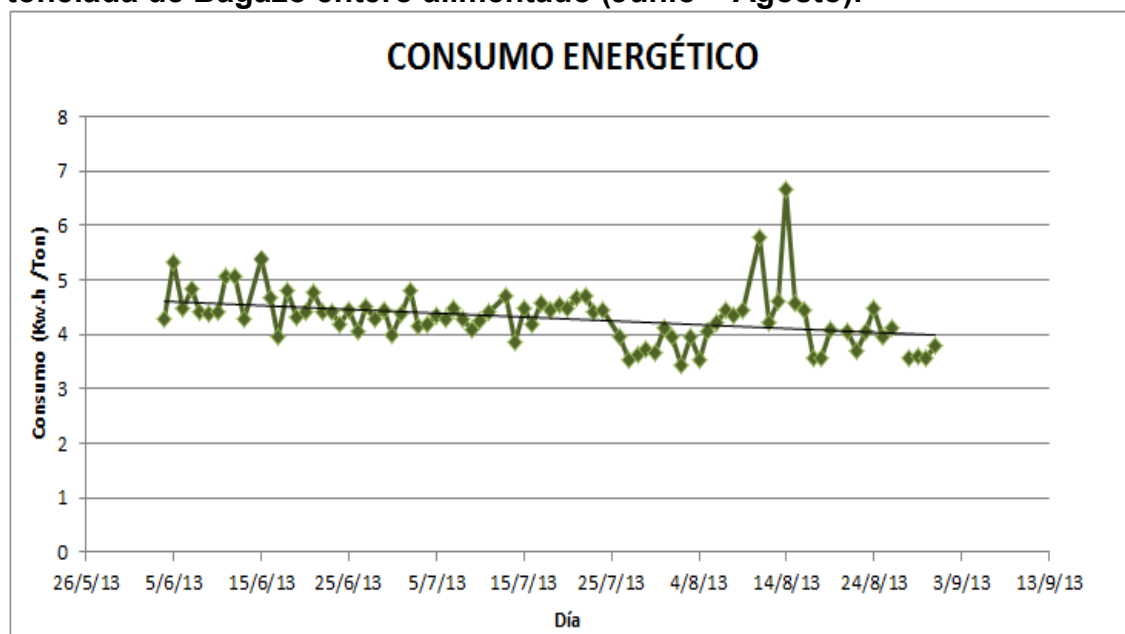


**Figura 54. Contenido de Fibra en el polvillo rechazado al central azucarero (Junio – Agosto).**

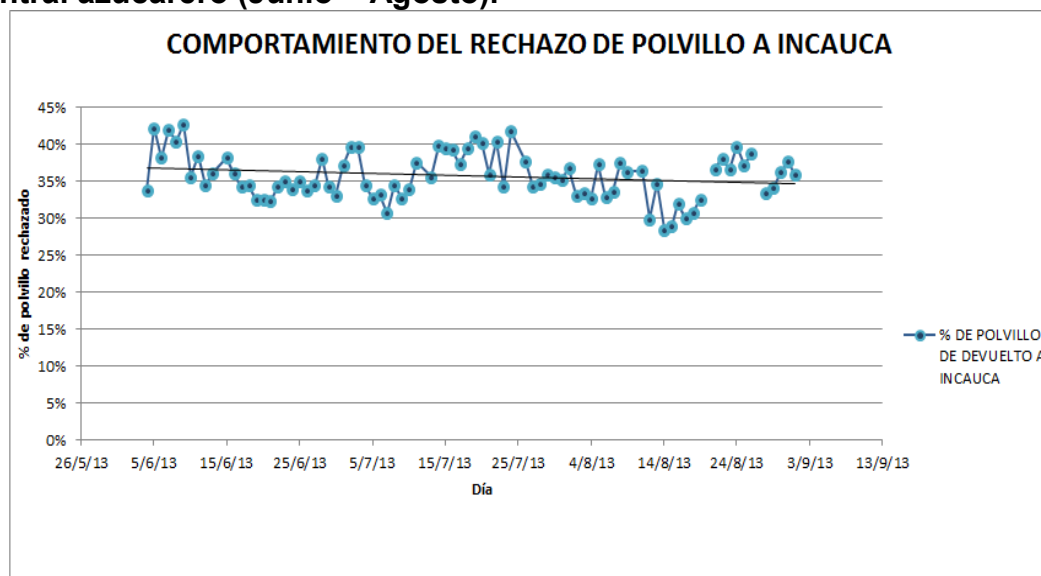




**Figura 55. Comportamiento y tendencia del consumo energético por tonelada de Bagazo entero alimentado (Junio – Agosto).**



**Figura 56. Comportamiento diario y tendencia del rechazo de polvillo al central azucarero (Junio – Agosto).**



A partir de la información reflejada en los meses de Junio, Julio y Agosto tenemos que:

**Cuadro 34. Resumen de los datos obtenidos en los meses de Junio, Julio y Agosto de 2013**

TABLA RESUMEN DE JUNIO A AGOSTO			
MES	JUNIO	JULIO	AGOSTO
CONSUMO ENERGÉTICO			
Consumo promedio por día (Kw.h/día)	7253	6716	5946
Consumo promedio por tonelada de bagazo entero (kw.h/ton)	4.50	4.24	4.04
CONTENIDO DE FIBRA			
Bagazo desmedulado	64.2%	66.4%	67.7%
Polvillo	22.1%	20.7%	22.3%
PORCENTAJE DE RECHAZO			
Polvillo	36.0%	36.7%	34.5%

Por tanto que el ahorro energético en el mes de Agosto están dados por,

**Cuadro 35. Ahorro por consumo energético en el mes de Agosto de 2013**

AHORRO POR CONSUMO ENERGÉTICO		
Precio de Kw.h	240.00	\$/kw.h
Ahorro energético en el mes de Agosto	0.20	kw.h/ton
Total de Bagazo entero suministrado en Agosto/013	41252.75	Ton
Ahorro total mes	\$ 1,993,388.51	

A parte del mejoramiento de la calidad del bagazo desmedulado generado por el cambio en la configuración de las cuchillas, también se obtuvo un ahorro por el costo de las mismas tanto en cuchillas nuevas como en cuchillas reparadas (Cuadros 34 y 35).

**Cuadro 36. Ahorro previsto en caso de compra de cuchillas nuevas**

AHORRO POR CANTIDAD DE CUCHILLAS NUEVAS					
Tiempo	CANTIDAD	TIPO	PRECIO/cuchilla	\$/ Tendido*Linea	TOTAL (4 Lineas)
ANTES	28	Cuchillas ventiladoras	\$ 46,000.00	\$ 1,288,000.00	\$ 5,152,000.00
AHORA	20	cuchillas planas	\$ 50,000.00	\$ 1,184,000.00	\$ 4,736,000.00
	4	Cuchillas ventiladoras	\$ 46,000.00		
AHORRO	4	UNIDADES		\$ 104,000.00	\$ 416,000.00
			TOTAL AHORRO (\$/ MES) =		\$ 2,140,651.80

la duración promedio de un tendido de cuchillas en funcionamiento en es 5.83 días, es decir, 140 hrs de trabajo

**Cuadro 37. Ahorro previsto en caso de compra de cuchillas reparadas**

AHORRO POR CANTIDAD DE CUCHILLAS REPARADAS					
Tiempo	CANTIDAD	TIPO	PRECIO/cuchilla	\$/ Tendido*Linea	TOTAL (4 Lineas)
ANTES	28	Cuchillas ventiladoras	\$ 14,950.00	\$ 418,600.00	\$ 1,674,400.00
AHORA	20	cuchillas planas	\$ 14,950.00	\$ 358,800.00	\$ 1,435,200.00
	4	Cuchillas ventiladoras	\$ 14,950.00		
<b>AHORRO</b>	<b>4</b>	<b>UNIDADES</b>		\$ 59,800.00	\$ 239,200.00
<b>TOTAL AHORRO (\$/ MES) =</b>					<b>\$ 1,230,874.79</b>

De lo anterior podemos concluir que,

- Se aumentó el contenido de fibra en el bagazo desmedulado proveniente del central azucarero con tendencia positiva. (Pendiente positiva, Figura No. 53).
- En el mes de Agosto de 2013 también se obtuvieron resultados favorables en torno al consumo energético de la planta de desmedulado (Pendiente Negativa, Figura No. 55)
- Al estudiar el comportamiento del porcentaje de polvillo que se rechaza hacia las calderas del central azucarero, vemos que se cumple con el acuerdo contractual que se sostiene con el mismo (Rechazo inferior al 40% del bagazo entero, Figura No 56).

Los beneficios obtenidos en el mes de Agostos de 2013 se resumen en el siguiente cuadro:

**Cuadro 38. Beneficios en el mes de Agosto de 2013**

BENEFICIOS LOGRADOS EN EL MES DE AGOSTO	
ENERGÉTICO	\$ 1,993,388.51
CUCHILLAS NUEVAS	\$ 2,140,651.80
CUCHILLAS REPARADAS	\$ 1,230,874.79
CALIDAD DE FIBRA	3.5%
RECHAZO DE POLVILLO	-1.5%

Por lo tanto, el estimado de ahorro anual (en condiciones de verano) es:

**Cuadro 39. Ahorro energético bajo condiciones de verano**

AHORRO POR CONSUMO ENERGÉTICO		
Precio de Kw.h	240.00	\$/kw.h
Promedio ahorro mes	0.23	kw.h/ton
Promedio de bagazo entero al día	1555.32	Ton/día
Ahorro por día	87,184.92	\$/día

**Cuadro 40. Estimación de ahorro anual**

ESTIMADO DE AHORRO ANUAL	
CUCHILLAS NUEVAS	\$ 25,687,821.61
CUCHILLAS REPARADAS	\$ 14,770,497.43
CONSUMO ENERGÉTICO	\$ 31,386,569.96

De lo anterior se puede decir que el ahorro (anual) atribuible a la ejecución del presente proyecto es de cuarenta y seis millones ciento cincuenta y siete mil cero sesenta y seis pesos (\$46'157.066) por concepto de consumo energético y consumo de cuchillas (solo usando cuchillas reparadas), más el aumento del contenido de fibra en el bagazo desmedulado en 3.5% y a la disminución en 1.5% del contenido de fibra en el polvillo.

## 8. CONCLUSIONES

Al principio del estudio la intención era experimentar con nuevas configuraciones en los equipos desmeduladores como alternativa a lo que actualmente se usa, utilizando diferentes configuraciones de cuchillas, dimensiones de agujeros de la criba y diferentes aperturas de alimentación de bagazo entero a los desmeduladores.

A través del ensayo real y práctico en los desmeduladores, se observó la importancia y/o magnitud del efecto de cada uno de los factores en estudio. De lo que podemos afirmar que:

✓ En aras de obtener un bagazo desmedulado con mayor contenido de fibra apta, es necesario controlar la apertura de alimentación de bagazo entero ya que este genera un efecto de gran magnitud sobre el objetivo antes planteado. No obstante, para esto se deben realizar cambios dentro de la planta de manera que esta pueda amortiguar los constantes cambios en cantidad de bagazo que suministra el central azucarero, para con esto evitar atascamientos y paradas en la línea de producción de bagazo desmedulado.

✓ La configuración de cuchillas no solo genera un gran efecto en la calidad del bagazo desmedulado sino también en el consumo energético de la planta de desmedulado, debido a que a mayor peso dentro de los equipos desmeduladores, menor es el requerimiento y por tanto consumo energético de los mismos.

✓ El diseño completamente al azar arrojó resultados favorables para el cumplimiento del objetivo del proyecto. Cabe resaltar su importancia debido a que fue la base del estudio teórico –práctico. A partir de este se concluyó que las configuraciones que arrojaron mejores resultados fueron 16 cuchillas planas – 8 cuchillas ventiladoras y 20 cuchillas planas – 4 cuchillas ventiladoras, que en el diseño corresponden a los tratamientos T19 y T21 respectivamente, que estadísticamente siendo diferentes de los demás tratamientos se puede decir que son iguales entre sí en el contenido promedio de fibra en el bagazo desmedulado y en el contenido promedio de fibra en el polvillo.

✓ En el diseño factorial 2 x 2 se evidenció que existe diferencia significativa entre las configuraciones de cuchillas [20P-4V, 16P-8V] únicamente cuando la apertura de alimentación de bagazo entero está al 70%, y que solo hay diferencia entre los niveles de apertura de alimentación [30%, 70%] mientras el equipo desmedulador se encuentre configurado con 20 cuchillas planas y 4 cuchillas ventiladoras.

✓ La condición con la que se obtuvo un mayor contenido de fibra el bagazo desmedulado fue con veinte (20) cuchillas planas, cuatro (4) cuchillas

ventiladoras, cribas con agujeros de 5/16 de pulgadas y con apertura de alimentación al 70%. No obstante, las corridas de prueba de resultados se realizó con una apertura de alimentación al 50% debido a que el sistema no podía amortiguar los constantes cambios de la cantidad de bagazo entero suministrado por parte del central azucarero.

✓ La dimensión de los agujeros de la criba es un factor importante para el contenido de fibra en el bagazo desmedulado y en el polvillo. Cabe resaltar, que mientras se aumenta el agujero de las cribas también se aumenta la proporción de rechazo de polvillo hacia el central azucarero colocando en riesgo el incumplimiento del contrato de realimentación de polvillo firmado entre el central azucarero y la empresa papelera. Por lo que se recomienda que en condiciones de verano se configuren los equipos desmeduladores con cribas de agujeros de 5/16 de pulgada.

✓ El estudio realizado arrojó resultados muy favorables para la empresa productora de papel, debido al ahorro económico proyectado y al haber obtenido información relacionada con el funcionamiento de los equipos desmeduladores, la capacidad y comportamiento de la planta de desmedulado, y las posibles respuestas de la misma bajo algún tipo de cambio que decidan realizar en los equipos desmeduladores.

## BIBLIOGRAFÍA

BRITOS, Leandro José y RAMIREZ, Gustavo Enrique. Proyecto de una planta de desmedulado a partir del bagazo de caña. Trabajo de grado Ingeniero Electromecánico. Asunción. Universidad Nacional de Asunción. Facultad de Ingeniería, 2012.

COCHRAN, William G. y COX, Gertrude M. Diseños experimentales. México: Editorial Trillas. 2ª Ed, 1990.125p

DIAZ, Abel. Diseño estadístico de experimentos. Colombia: Editorial Universidad de Antioquia, 1999. 8-204p

ESCALONA MORENO, Luis Alberto. Evaluación del sistema de desmedulado en el proceso en planta de pulpa. Trabajo de grado Ingeniero Forestal. Mérida. Universidad de los Andes. Facultad de Ciencias Forestales, 1990.

FISHER AYLMEER, Ronald. Título: The Arrangement of Field Experiments. Journal of the Ministry of Agriculture of Great Britain 33: pag 503–513. Gran Bretaña, 1926.

GALLO GALVEZ, Jaid; MOLANO TRIVIÑO, Juan Carlos y VELEZ LOURIDO, Álvaro. Mejoramiento del diseño de las cuchillas de los desmeduladores de bagazo crudo en propal planta No. 2. Trabajo de grado Ingeniero Mecánico. Santiago de Cali. Universidad Autónoma de Occidente. Facultad de Ingeniería, 1997.

GUTIÉRREZ PULIDO, Humberto y DE LA VARA SALAZAR, Román. Análisis y diseño de experimentos. 3 ed. México: Mc Graw Hill, 2012. 52- 170p

GUTIÉRREZ PULIDO, Humberto y DE LA VARA SALAZAR, Román. Control estadístico de calidad y seis sigma. 2 ed. México: Mc Graw Hill, 2009. 140-160p

Historia de la caña de azúcar [en línea ] [consultado 15 de marzo de 2013]  
Disponible en internet: [www.procaña.org](http://www.procaña.org) [24 de Mayo de 2013]

MOORE, David. Estadística aplicada básica. 2 ed. Estados Unidos: W. H. Freeman and Company, 2000. 233-247p

NAPOLITANO, Horacio. Título: Diseño de experimentos. En: Educación en Ciencias Químicas – Industria & Química. N° 354. 62 - 70p

ROSETE BARRERA, David Eduardo. Propuesta de un sistema de desmedulado, para la obtención de fibra de Agave tomado de los desechos de las fábricas tequileras de Arandas Jalisco. Tesis de grado Ingeniero Mecánico. México. Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica – Unidad Culhuacan. 2009.

SCHEAFFER, Richard; MENDENHALL, William y OTT, Lyman. Elementos de muestreo. 2 ed. México: Grupo Editorial Iberoamérica, 1987. 167-185p

WALPOLE, Ronald; MYERS, Raymond y MYERS, Sharon. Probabilidad y estadística para ingenieros. 6 ed. México: Prentice-hall Hispanoamericana, S.A, 1999. 527-564p



## ANEXOS

### Anexo A. Tabla de la distribución F de Fisher ( $\alpha=0.05$ ) para $1 \leq v_1 \leq 20$

$1 - \alpha = 0.95$   $v_1$  = grados de libertad del numerador  
 $1 - \alpha = P(F \leq f_{\alpha, v_1, v_2})$   $v_2$  = grados de libertad del denominador

$v_2 \backslash v_1$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	161.446	199.499	215.707	224.583	230.160	233.988	236.767	238.884	240.543	241.882	242.981	243.905	244.690	245.363	245.949	246.466	246.917	247.324	247.688	248.016
2	18.513	19.000	19.164	19.247	19.296	19.329	19.353	19.371	19.385	19.396	19.405	19.412	19.419	19.424	19.429	19.433	19.437	19.440	19.443	19.446
3	10.128	9.552	9.277	9.117	9.013	8.941	8.887	8.845	8.812	8.785	8.763	8.745	8.729	8.715	8.703	8.692	8.683	8.675	8.667	8.660
4	7.709	6.944	6.591	6.388	6.256	6.163	6.094	6.041	5.999	5.964	5.936	5.912	5.891	5.873	5.858	5.844	5.832	5.821	5.811	5.803
5	6.608	5.786	5.409	5.192	5.050	4.950	4.876	4.818	4.772	4.735	4.704	4.678	4.655	4.636	4.619	4.604	4.590	4.579	4.568	4.558
6	5.987	5.143	4.757	4.534	4.387	4.284	4.207	4.147	4.099	4.060	4.027	4.000	3.976	3.956	3.938	3.922	3.908	3.896	3.884	3.874
7	5.591	4.737	4.347	4.120	3.972	3.866	3.787	3.726	3.677	3.637	3.603	3.575	3.550	3.529	3.511	3.494	3.480	3.467	3.455	3.445
8	5.318	4.459	4.066	3.838	3.688	3.581	3.500	3.438	3.388	3.347	3.313	3.284	3.259	3.237	3.218	3.202	3.187	3.173	3.161	3.150
9	5.117	4.256	3.863	3.633	3.482	3.374	3.293	3.230	3.179	3.137	3.102	3.073	3.048	3.025	3.006	2.989	2.974	2.960	2.948	2.936
10	4.965	4.103	3.708	3.478	3.326	3.217	3.135	3.072	3.020	2.978	2.943	2.913	2.887	2.865	2.845	2.828	2.812	2.798	2.785	2.774
11	4.844	3.982	3.587	3.357	3.204	3.095	3.012	2.948	2.896	2.854	2.818	2.788	2.761	2.739	2.719	2.701	2.685	2.671	2.658	2.646
12	4.747	3.885	3.490	3.259	3.106	2.996	2.913	2.849	2.796	2.753	2.717	2.687	2.660	2.637	2.617	2.599	2.583	2.568	2.555	2.544
13	4.667	3.806	3.411	3.179	3.025	2.915	2.832	2.767	2.714	2.671	2.635	2.604	2.577	2.554	2.533	2.515	2.499	2.484	2.471	2.459
14	4.600	3.739	3.344	3.112	2.958	2.848	2.764	2.699	2.646	2.602	2.565	2.534	2.507	2.484	2.463	2.445	2.428	2.413	2.400	2.388
15	4.543	3.682	3.287	3.056	2.901	2.790	2.707	2.641	2.588	2.544	2.507	2.475	2.448	2.424	2.403	2.385	2.368	2.353	2.340	2.328
16	4.494	3.634	3.239	3.007	2.852	2.741	2.657	2.591	2.538	2.494	2.456	2.425	2.397	2.373	2.352	2.333	2.317	2.302	2.288	2.276
17	4.451	3.592	3.197	2.965	2.810	2.699	2.614	2.548	2.494	2.455	2.417	2.386	2.358	2.334	2.313	2.294	2.278	2.263	2.249	2.237
18	4.414	3.555	3.160	2.928	2.773	2.661	2.576	2.510	2.456	2.417	2.378	2.347	2.319	2.295	2.273	2.254	2.238	2.223	2.209	2.197
19	4.381	3.522	3.127	2.895	2.740	2.628	2.542	2.476	2.422	2.382	2.343	2.311	2.283	2.259	2.237	2.218	2.202	2.187	2.173	2.161
20	4.351	3.493	3.098	2.866	2.711	2.599	2.513	2.447	2.393	2.353	2.314	2.282	2.254	2.230	2.208	2.189	2.173	2.158	2.144	2.132
21	4.325	3.467	3.072	2.840	2.685	2.573	2.487	2.421	2.367	2.326	2.287	2.255	2.227	2.199	2.175	2.156	2.140	2.125	2.111	2.099
22	4.301	3.443	3.048	2.815	2.660	2.548	2.462	2.396	2.342	2.299	2.260	2.228	2.199	2.175	2.151	2.132	2.116	2.101	2.087	2.075
23	4.279	3.422	3.027	2.794	2.639	2.527	2.441	2.375	2.321	2.278	2.239	2.207	2.178	2.154	2.130	2.111	2.095	2.080	2.066	2.054
24	4.260	3.403	3.008	2.775	2.620	2.508	2.422	2.356	2.302	2.259	2.220	2.188	2.159	2.135	2.111	2.092	2.076	2.061	2.047	2.035
25	4.242	3.385	2.990	2.757	2.602	2.490	2.404	2.338	2.284	2.241	2.202	2.170	2.141	2.117	2.093	2.074	2.058	2.043	2.029	2.017
26	4.225	3.369	2.974	2.741	2.586	2.474	2.388	2.322	2.268	2.225	2.186	2.154	2.125	2.101	2.077	2.058	2.042	2.027	2.013	2.001
27	4.210	3.354	2.959	2.726	2.571	2.459	2.373	2.307	2.253	2.210	2.171	2.139	2.110	2.086	2.062	2.043	2.027	2.012	1.998	1.986
28	4.196	3.340	2.945	2.712	2.557	2.445	2.359	2.293	2.239	2.196	2.157	2.125	2.096	2.072	2.048	2.029	2.013	1.998	1.984	1.972
29	4.183	3.328	2.933	2.700	2.545	2.433	2.347	2.281	2.227	2.184	2.145	2.113	2.084	2.060	2.036	2.017	2.001	1.986	1.972	1.960
30	4.171	3.316	2.921	2.688	2.533	2.421	2.335	2.269	2.215	2.172	2.133	2.101	2.072	2.048	2.024	2.005	1.989	1.974	1.960	1.948
40	4.085	3.232	2.837	2.604	2.449	2.337	2.251	2.185	2.131	2.088	2.049	2.017	1.988	1.964	1.940	1.921	1.905	1.890	1.876	1.864
50	4.034	3.183	2.788	2.555	2.400	2.288	2.199	2.133	2.079	2.036	1.997	1.965	1.936	1.912	1.888	1.869	1.853	1.838	1.824	1.812
60	4.001	3.150	2.755	2.522	2.367	2.255	2.166	2.099	2.045	1.999	1.960	1.928	1.899	1.875	1.851	1.832	1.816	1.801	1.787	1.774
70	3.978	3.128	2.733	2.500	2.345	2.233	2.144	2.077	2.023	1.977	1.938	1.906	1.877	1.853	1.829	1.810	1.794	1.779	1.765	1.752
80	3.960	3.111	2.716	2.483	2.328	2.216	2.127	2.060	2.006	1.960	1.921	1.889	1.860	1.836	1.812	1.793	1.777	1.762	1.748	1.735
90	3.947	3.098	2.703	2.470	2.315	2.203	2.114	2.047	1.993	1.947	1.908	1.876	1.847	1.823	1.799	1.780	1.764	1.749	1.735	1.722
100	3.936	3.087	2.692	2.459	2.304	2.192	2.103	2.036	1.982	1.936	1.897	1.865	1.836	1.812	1.788	1.769	1.753	1.738	1.724	1.711
200	3.888	3.041	2.650	2.417	2.262	2.150	2.061	1.994	1.940	1.894	1.855	1.823	1.794	1.770	1.746	1.727	1.711	1.696	1.682	1.669
500	3.860	3.014	2.623	2.390	2.235	2.123	2.034	1.967	1.913	1.867	1.828	1.796	1.767	1.743	1.719	1.700	1.684	1.669	1.655	1.642
1000	3.851	3.005	2.614	2.381	2.226	2.114	2.025	1.958	1.904	1.858	1.819	1.787	1.758	1.734	1.710	1.691	1.675	1.660	1.646	1.633

Elaborada por Irene Patricia Valdez y Alfaro.

## Anexo B. Tabla de la distribución F de Fisher ( $\alpha=0.05$ ) para $21 \leq v_1 \leq 1000$

$1 - \alpha = 0.95$

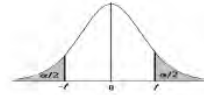
$1 - \alpha = P(F \leq f_{\alpha, v_1, v_2})$

$v_2 \backslash v_1$	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	40	50	60	70	80	90	100	200	500	1000
1	248.307	248.579	248.823	249.052	249.260	249.453	249.631	249.798	249.951	250.096	251.144	251.774	252.196	252.498	252.723	252.898	253.043	253.676	254.062	254.186
2	19.448	19.450	19.452	19.454	19.456	19.457	19.459	19.460	19.461	19.463	19.471	19.476	19.479	19.481	19.483	19.485	19.486	19.491	19.494	19.495
3	8.654	8.648	8.643	8.638	8.634	8.630	8.626	8.623	8.620	8.617	8.594	8.581	8.572	8.566	8.561	8.557	8.554	8.540	8.532	8.529
4	5.795	5.787	5.781	5.774	5.769	5.763	5.759	5.754	5.750	5.746	5.717	5.699	5.688	5.679	5.673	5.668	5.664	5.646	5.635	5.632
5	4.549	4.541	4.534	4.527	4.521	4.515	4.510	4.505	4.500	4.496	4.464	4.444	4.431	4.422	4.415	4.409	4.405	4.385	4.373	4.369
6	3.865	3.856	3.849	3.841	3.835	3.829	3.823	3.818	3.813	3.808	3.774	3.754	3.740	3.730	3.722	3.716	3.712	3.690	3.678	3.673
7	3.435	3.426	3.418	3.410	3.404	3.397	3.391	3.386	3.381	3.376	3.340	3.319	3.304	3.294	3.286	3.280	3.275	3.252	3.239	3.234
8	3.140	3.131	3.123	3.115	3.108	3.102	3.095	3.090	3.084	3.079	3.043	3.020	3.005	2.994	2.986	2.980	2.975	2.951	2.937	2.932
9	2.926	2.917	2.908	2.900	2.893	2.886	2.880	2.874	2.869	2.864	2.826	2.803	2.787	2.776	2.768	2.761	2.756	2.731	2.717	2.712
10	2.764	2.754	2.745	2.737	2.730	2.723	2.716	2.710	2.705	2.700	2.661	2.637	2.621	2.609	2.601	2.594	2.588	2.563	2.548	2.543
11	2.636	2.626	2.617	2.609	2.601	2.594	2.588	2.582	2.576	2.570	2.531	2.507	2.490	2.478	2.469	2.462	2.457	2.431	2.415	2.410
12	2.533	2.523	2.514	2.505	2.498	2.491	2.484	2.478	2.472	2.466	2.426	2.401	2.384	2.372	2.363	2.356	2.350	2.323	2.307	2.302
13	2.448	2.438	2.429	2.420	2.412	2.405	2.398	2.392	2.386	2.380	2.339	2.314	2.297	2.284	2.275	2.267	2.261	2.234	2.218	2.212
14	2.377	2.367	2.357	2.349	2.341	2.333	2.326	2.320	2.314	2.308	2.266	2.241	2.223	2.210	2.201	2.193	2.187	2.159	2.142	2.136
15	2.316	2.306	2.297	2.288	2.280	2.272	2.265	2.259	2.253	2.247	2.204	2.178	2.160	2.147	2.137	2.130	2.123	2.095	2.078	2.072
16	2.264	2.254	2.244	2.235	2.227	2.220	2.212	2.206	2.200	2.194	2.151	2.124	2.106	2.093	2.083	2.075	2.068	2.039	2.022	2.016
17	2.219	2.208	2.199	2.190	2.181	2.174	2.167	2.160	2.154	2.148	2.104	2.077	2.058	2.045	2.035	2.027	2.020	1.991	1.973	1.967
18	2.179	2.168	2.159	2.150	2.141	2.134	2.126	2.119	2.113	2.107	2.063	2.035	2.017	2.003	1.993	1.985	1.978	1.948	1.929	1.923
19	2.144	2.133	2.123	2.114	2.106	2.098	2.090	2.084	2.077	2.071	2.026	1.999	1.980	1.966	1.955	1.947	1.940	1.910	1.891	1.884
20	2.112	2.102	2.092	2.082	2.074	2.066	2.059	2.052	2.045	2.039	1.994	1.966	1.946	1.932	1.922	1.913	1.907	1.875	1.856	1.850
21	2.084	2.073	2.063	2.054	2.045	2.037	2.030	2.023	2.016	2.010	1.965	1.936	1.916	1.902	1.891	1.883	1.876	1.845	1.825	1.818
22	2.059	2.048	2.038	2.028	2.020	2.012	2.004	1.997	1.990	1.984	1.938	1.909	1.889	1.875	1.864	1.856	1.849	1.817	1.797	1.790
23	2.036	2.025	2.014	2.005	1.996	1.988	1.981	1.973	1.967	1.961	1.914	1.885	1.865	1.850	1.839	1.830	1.823	1.791	1.771	1.764
24	2.015	2.003	1.993	1.984	1.975	1.967	1.959	1.952	1.945	1.939	1.892	1.863	1.842	1.828	1.816	1.808	1.800	1.768	1.747	1.740
25	1.995	1.984	1.974	1.964	1.955	1.947	1.939	1.932	1.926	1.919	1.872	1.842	1.822	1.807	1.796	1.787	1.779	1.746	1.725	1.718
26	1.978	1.966	1.956	1.946	1.938	1.929	1.921	1.914	1.907	1.901	1.853	1.823	1.803	1.788	1.776	1.767	1.760	1.726	1.705	1.698
27	1.961	1.950	1.940	1.930	1.921	1.913	1.905	1.898	1.891	1.884	1.836	1.806	1.785	1.770	1.758	1.749	1.742	1.708	1.686	1.679
28	1.946	1.935	1.924	1.915	1.906	1.897	1.889	1.882	1.875	1.869	1.820	1.790	1.769	1.754	1.742	1.733	1.725	1.691	1.669	1.662
29	1.932	1.921	1.910	1.901	1.891	1.883	1.875	1.868	1.861	1.854	1.806	1.775	1.754	1.738	1.726	1.717	1.710	1.675	1.653	1.645
30	1.919	1.908	1.897	1.887	1.878	1.870	1.862	1.854	1.847	1.841	1.792	1.761	1.740	1.724	1.712	1.703	1.695	1.660	1.637	1.630
40	1.826	1.814	1.803	1.793	1.783	1.775	1.766	1.759	1.751	1.744	1.693	1.660	1.637	1.621	1.608	1.597	1.589	1.551	1.526	1.517
50	1.771	1.759	1.748	1.737	1.727	1.718	1.710	1.702	1.694	1.687	1.634	1.599	1.576	1.558	1.544	1.534	1.525	1.484	1.457	1.448
60	1.735	1.722	1.711	1.700	1.690	1.681	1.672	1.664	1.656	1.649	1.594	1.559	1.534	1.516	1.502	1.491	1.481	1.438	1.409	1.399
70	1.709	1.696	1.685	1.674	1.664	1.654	1.646	1.637	1.629	1.622	1.566	1.530	1.505	1.486	1.471	1.459	1.450	1.404	1.374	1.364
80	1.689	1.677	1.665	1.654	1.644	1.634	1.626	1.617	1.609	1.602	1.545	1.508	1.482	1.463	1.448	1.436	1.426	1.379	1.347	1.336
90	1.675	1.662	1.650	1.639	1.629	1.619	1.610	1.601	1.593	1.586	1.528	1.491	1.465	1.445	1.429	1.417	1.407	1.358	1.326	1.314
100	1.663	1.650	1.638	1.627	1.616	1.607	1.598	1.589	1.581	1.573	1.515	1.477	1.450	1.430	1.415	1.402	1.392	1.342	1.308	1.296

## Anexo C. Tabla de la t Student para $\alpha/2$

**Tabla de la t de Student.**

Contiene los valores  $t$  tales que  $p[|T| > t] = \alpha$ ,  
donde  $n$  son los grados de libertad.



$n \setminus \alpha$	0,90	0,80	0,70	0,50	0,30	0,20	0,10	0,05	0,02	0,01	0,001
1	0,1584	0,3249	0,5095	1,0000	1,9626	3,0777	6,3137	12,7062	31,8210	63,6559	636,5776
2	0,1421	0,2887	0,4447	0,8165	1,3862	1,8856	2,9200	4,3027	6,9645	9,9250	31,5998
3	0,1366	0,2767	0,4242	0,7649	1,2498	1,6377	2,3534	3,1824	4,5407	5,8408	12,9244
4	0,1338	0,2707	0,4142	0,7407	1,1896	1,5332	2,1318	2,7765	3,7469	4,6041	8,6101
5	0,1322	0,2672	0,4082	0,7267	1,1558	1,4759	2,0150	2,5706	3,3649	4,0321	6,8685
6	0,1311	0,2648	0,4043	0,7176	1,1342	1,4398	1,9432	2,4469	3,1427	3,7074	5,9587
7	0,1303	0,2632	0,4015	0,7111	1,1192	1,4149	1,8946	2,3646	2,9979	3,4995	5,4081
8	0,1297	0,2619	0,3995	0,7064	1,1081	1,3968	1,8595	2,3060	2,8965	3,3554	5,0414
9	0,1293	0,2610	0,3979	0,7027	1,0997	1,3830	1,8331	2,2622	2,8214	3,2498	4,7809
10	0,1289	0,2602	0,3966	0,6998	1,0931	1,3722	1,8125	2,2281	2,7638	3,1693	4,5868
11	0,1286	0,2596	0,3956	0,6974	1,0877	1,3634	1,7959	2,2010	2,7181	3,1058	4,4369
12	0,1283	0,2590	0,3947	0,6955	1,0832	1,3562	1,7823	2,1788	2,6810	3,0545	4,3178
13	0,1281	0,2586	0,3940	0,6938	1,0795	1,3502	1,7709	2,1604	2,6503	3,0123	4,2209
14	0,1280	0,2582	0,3933	0,6924	1,0763	1,3450	1,7613	2,1448	2,6245	2,9768	4,1403
15	0,1278	0,2579	0,3928	0,6912	1,0735	1,3406	1,7531	2,1315	2,6025	2,9467	4,0728
16	0,1277	0,2576	0,3923	0,6901	1,0711	1,3368	1,7459	2,1199	2,5835	2,9208	4,0149
17	0,1276	0,2573	0,3919	0,6892	1,0690	1,3334	1,7396	2,1098	2,5669	2,8982	3,9651
18	0,1274	0,2571	0,3915	0,6884	1,0672	1,3304	1,7341	2,1009	2,5524	2,8784	3,9217
19	0,1274	0,2569	0,3912	0,6876	1,0655	1,3277	1,7291	2,0930	2,5395	2,8609	3,8833
20	0,1273	0,2567	0,3909	0,6870	1,0640	1,3253	1,7247	2,0860	2,5280	2,8453	3,8496
21	0,1272	0,2566	0,3906	0,6864	1,0627	1,3232	1,7207	2,0796	2,5176	2,8314	3,8193
22	0,1271	0,2564	0,3904	0,6858	1,0614	1,3212	1,7171	2,0739	2,5083	2,8188	3,7922
23	0,1271	0,2563	0,3902	0,6853	1,0603	1,3195	1,7139	2,0687	2,4999	2,8073	3,7676
24	0,1270	0,2562	0,3900	0,6848	1,0593	1,3178	1,7109	2,0639	2,4922	2,7970	3,7454
25	0,1269	0,2561	0,3898	0,6844	1,0584	1,3163	1,7081	2,0595	2,4851	2,7874	3,7251
26	0,1269	0,2560	0,3896	0,6840	1,0575	1,3150	1,7056	2,0555	2,4786	2,7787	3,7067
27	0,1268	0,2559	0,3894	0,6837	1,0567	1,3137	1,7033	2,0518	2,4727	2,7707	3,6895
28	0,1268	0,2558	0,3893	0,6834	1,0560	1,3125	1,7011	2,0484	2,4671	2,7633	3,6739
29	0,1268	0,2557	0,3892	0,6830	1,0553	1,3114	1,6991	2,0452	2,4620	2,7564	3,6595
30	0,1267	0,2556	0,3890	0,6828	1,0547	1,3104	1,6973	2,0423	2,4573	2,7500	3,6460
40	0,1265	0,2550	0,3881	0,6807	1,0500	1,3031	1,6839	2,0211	2,4233	2,7045	3,5510
80	0,1261	0,2542	0,3867	0,6776	1,0432	1,2922	1,6641	1,9901	2,3739	2,6387	3,4164
120	0,1259	0,2539	0,3862	0,6765	1,0409	1,2886	1,6576	1,9799	2,3578	2,6174	3,3734
$\infty$	0,126	0,253	0,385	0,674	1,036	1,282	1,645	1,96	2,326	2,576	3,291